

**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

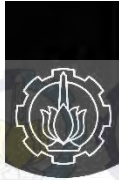
**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PERANCANGAN PENGHAPUSAN DERAU AKTIF PADA  
HEADPHONE MELALUI METODE *FILTERED X LEAST  
MEAN SQUARE***

Azhar Rasyid Firdausi  
NRP. 2211 100 127

Dosen Pembimbing  
Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

***DESIGN OF ACTIVE NOISE CANCELLING HEADPHONE  
WITH FILTERED X LEAST MEAN SQUARE METHOD***

Azhar Rasyid Firdausi  
NRP. 2211 100 127

*Supervisor*  
Ir. Rusdhianto Effendie A.K., MT.

***DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Insitute of Technology  
Surabaya 2016***

**PERANCANGAN PENGHAPUSAN DERAU AKTIF PADA  
HEADPHONE MELALUI METODE *FILTERED X LEAST MEAN*  
*SQUARE***

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing**



**Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.**

**NIP. 195704241985021001**





# PERANCANGAN PENGHAPUSAN DERAU AKTIF PADA HEADPHONE MELALUI METODE *FILTERED X LEAST MEAN SQUARE*

Azhar Rasyid Firdausi  
2211 100 127

Dosen Pembimbing : Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.

## ABSTRAK

Derau atau *noise* yang berasal dari lingkungan dapat mengganggu orang yang menggunakan *headphone*. Meskipun sebagian *headphone* mampu menghapus derau secara pasif, tidak semua derau dapat diredam terutama untuk derau yang memiliki frekuensi rendah. ANC *headphone* menghapus derau yang memiliki frekuensi rendah yang masuk ke dalam *headphone* dengan sinyal interferensi yang menghancurkan sinyal derau yang disebut dengan anti *noise*. Namun ANC memiliki beberapa permasalahan seperti terdapat waktu tunda pada sinyal anti *noise*. Metode *Filtered x Least Mean Square* digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Hasil simulasi menunjukkan bahwa algoritma FxLMS mampu meredam suara mobil dalam bentuk rekaman sebesar 30 dB pada frekuensi 0 Hz sampai dengan 1000 Hz dan 5 dB ketika suara rekaman mobil di atas 1500 Hz dengan *step size* sebesar 0,5.

**Kata Kunci :** *Active Noise Cancelling Headphone, Filtered x Least Mean Square Method*

## **DESIGN OF ACTIVE NOISE CANCELLING HEADPHONE WITH FILTERED X LEAST MEAN SQUARE METHOD**

Azhar Rasyid Firdausi  
2211 100 127

*Supervisor* : Ir. Rusdhianto Effendie A.K., M.T.

### **ABSTRACT**

Noise that comes from the environment can interfere with people who use headphones. Although most headphones are capable of removing noise passively, not all noise can be muted especially for noise that has a low frequency. ANC headphones remove noise that has a low frequency that is entered into the headphones with a devastating signal interference signal noise called anti noise. But the ANC has some problems as there is a time delay on the anti noise signal. Method of Filtered x Least Mean Square is used to overcome these problems. Simulation results show that the FxLMS algorithm able to mute the car in the form of recordings almost 30 dB at frequencies 0 Hz up to 1000 Hz and 5 dB when the voice of the car above 1500 Hz with a step size of 0.5.

**Keywords :** Active Noise Cancelling Headphone, Filtered x Least Mean Square Method

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan buku tugas akhir dengan judul **“PERANCANGAN PENGHAPUSAN DERAU AKTIF PADA HEADPHONE MELALUI METODE *FILTERED X LEAST MEAN SQUARE*”**. Tugas akhir merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk menyelesaikan program studi Strata-1 pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini banyak mengalami kendala, namun berkat bantuan, bimbingan, dan kerja sama dari berbagai pihak sehingga kendala-kendala tersebut dapat di atasi. Untuk itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan banyak terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada :

1. Kedua orang tua, dan adik-adik saya yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa kepada penulis.
2. Bapak Rusdhianto selaku Dosen Pembimbing atas segala bantuan, perhatian, dan arahan selama pengerjaan tugas akhir in serta selaku Koordinator Bidang Studi Sistem Pengaturan Jurusan Teknik Elektro ITS.
3. Bapak Ardyono Priyadi selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS.
4. Rekan-rekan E51 yang masih menjalani tugas akhir khususnya Muhammad Iqbal Fauzi, Fairuzza Dinansyar, Irwan Eko Prabowo, Mohammad Safruriza, Guntur Sathia Putra, Tri Wahyu Kurniawan, Muhammad Ammar Huwaidi, Muhammad Fadli Ilmi, Ilham Fahmi Kurniawan, dan Mochamad Farid Mustofa.

Penulis berharap tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi yang membutuhkannya.

Surabaya, 13 Januari 2016

Penulis



# DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xi</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	1
1.3 Batasan Masalah.....	1
1.4 Tujuan Penelitian .....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	2
1.6 Relevansi.....	3
<b>BAB 2 DASAR TEORI</b> .....	<b>5</b>
2.1 Derau dan Pendengaran .....	5
2.2 <i>Passive Noise Cancelling</i> .....	6
2.3 <i>Active Noise Cancelling</i> .....	7
2.3.1 <i>Feedforward ANC</i> .....	8
2.3.2 <i>Adaptive Feedforward ANC</i> .....	12
2.4 Aplikasi Filter Adaptif.....	14
2.4.1 Identifikasi Sistem.....	14
2.4.2 Penghapusan Interferensi.....	14
2.5 Filter Digital.....	15
2.5.1 Filter FIR .....	16
2.5.2 Filter <i>Wiener</i> .....	17
2.6 <i>Least Mean Square (LMS)</i> .....	18
2.7 <i>Filtered x Least Mean Square</i> .....	20
2.8 MATLAB .....	21
<b>BAB 3 PERANCANGAN SISTEM</b> .....	<b>25</b>
3.1 Gambaran Umum Sistem.....	25
3.2 Perancangan Perangkat Keras.....	26
3.2.1 <i>Headphone Sony MDR-ZX310</i> .....	26
3.2.2 Mikrofon MAX9812 dan Manekin .....	28
3.3 Prosedur Eksperimen.....	29
3.3.1 Pengambilan Data Jalur Primer.....	29
3.3.2 Pengambilan Data Jalur Sekunder .....	30

3.4	Perancangan Perangkat Lunak MATLAB .....	31
3.5	Pemodelan Sistem .....	31
3.5.1	Analisis Spektra <i>Welch</i> Jalur Primer .....	31
3.5.2	Pemodelan Filter FIR Jalur Primer .....	32
3.5.3	Analisis Spektra <i>Welch</i> Jalur Sekunder .....	33
3.5.4	Pemodelan Filter FIR Jalur Sekunder .....	33
3.6	Perancangan <i>Active Noise Cancelling</i> .....	34
3.6.1	<i>Flowchart</i> Algoritma FxLMS .....	34
3.6.2	Perancangan LMS .....	36
3.6.3	Perancangan ANC <i>Filtered x Least Mean Square</i> .....	38
<b>BAB 4</b>	<b>SIMULASI DAN ANALISIS .....</b>	<b>41</b>
4.1	Sistem ANC dengan Sinyal Masukan <i>White Noise</i> .....	41
4.2	Sistem ANC dengan Sinyal Masukan <i>Pink Noise</i> .....	43
4.3	Sistem ANC dengan Sinyal Masukan <i>Engine Sound</i> .....	46
<b>BAB 5</b>	<b>PENUTUP .....</b>	<b>51</b>
5.1	Kesimpulan .....	51
5.2	Saran .....	51
	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>53</b>
	<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>55</b>



## TABLE OF CONTENT

<b>ABSTRAK.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>PREFACE .....</b>	<b>v</b>
<b>TABLE OF CONTENT .....</b>	<b>vii</b>
<b>LIST OF FIGURES .....</b>	<b>ix</b>
<b>LIST OF TABLES .....</b>	<b>xi</b>
<b>BAB 1 PRELIMINARY.....</b>	<b>1</b>
1.1 Background.....	1
1.2 Formulation of Problems .....	1
1.3 Scope of Problems.....	1
1.4 Research Purpose .....	2
1.5 Systematic Discussion .....	2
1.6 Relevance.....	3
<b>BAB 2 BASIC THEORY .....</b>	<b>5</b>
2.1 Noise and Hearing.....	5
2.2 Passive Noise Cancelling.....	6
2.3 Active Noise Cancelling .....	7
2.3.1 Feedforward ANC.....	8
2.3.2 Adaptive Feedforward ANC.....	12
2.4 Adaptive Filter Application.....	14
2.4.1 System Identification.....	14
2.4.2 Interference Cancelling .....	14
2.5 Digital Filter.....	15
2.5.1 FIR Filter .....	16
2.5.2 WienerFilter .....	17
2.6 Least Mean Square (LMS).....	18
2.7 Filtered x Least Mean Square .....	20
2.8 MATLAB .....	21
<b>BAB 3 SYSTEM DESIGN .....</b>	<b>25</b>
3.1 System Description .....	25
3.2 Hardware Design.....	26
3.2.1 Headphone Sony MDR-ZX310 .....	26
3.2.2 MAX9812 Microphone and Manequin .....	28
3.3 Experimen Procedure .....	29
3.3.1 Primary Path Data Acquisition .....	29
3.3.2 Secondary Path Acquisition.....	30

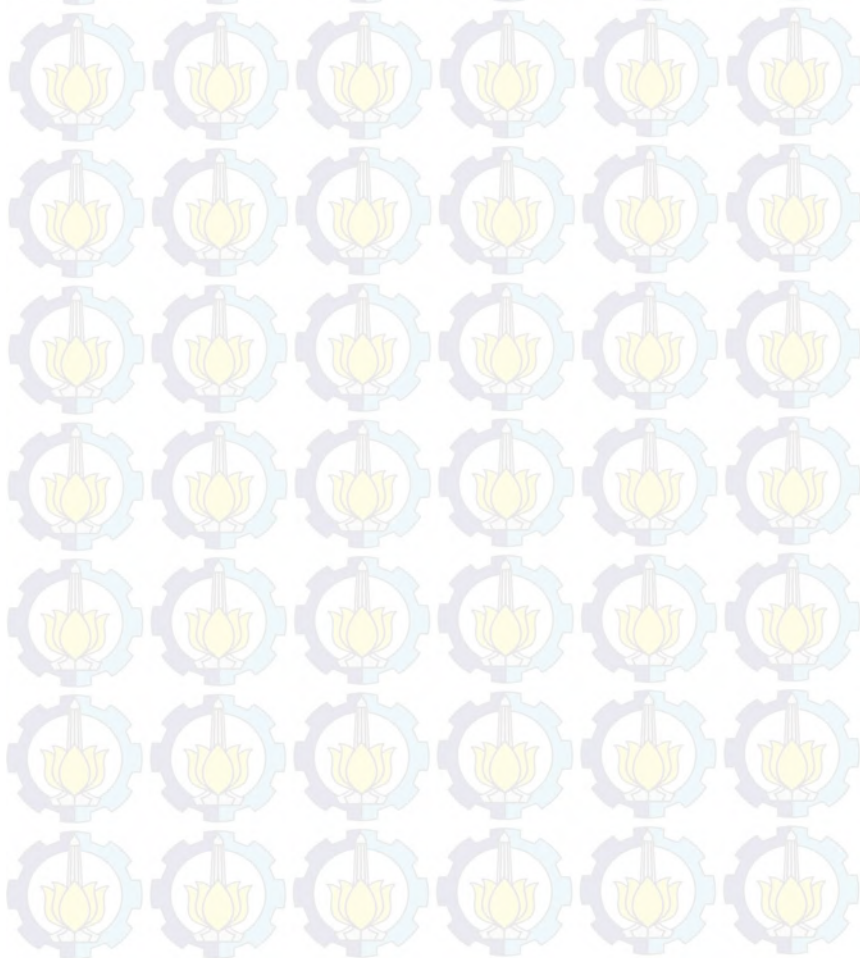
3.4	Software Design MATLAB.....	31
3.5	System Modelling .....	31
3.5.1	Welch Spectrum Analysis of Primary Path .....	31
3.5.2	FIR Filter Modelling of Primary Path .....	32
3.5.3	Welch Spectrum Analysis of Secondary Path .....	33
3.5.4	FIR Filter Modelling of Secondary Path .....	33
3.6	Active Noise Cancelling Design .....	34
3.6.1	Flowchart of FxLMS Algorithm .....	34
3.6.2	LMS Design .....	36
3.6.3	ANC Filtered x Least Mean Square Design .....	38
<b>BAB 4</b>	<b>SIMULATION AND ANALYSIS.....</b>	<b>41</b>
4.1	ANC System with Input Signal White Noise .....	41
4.2	ANC System with Input Signal Pink Noise.....	43
4.3	ANC System with Input Signal Engine Sound .....	46
<b>BAB 5</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>51</b>
5.1	Conclusion .....	51
5.2	Recomendation.....	51
	<b>BIBLIOGRAPHY .....</b>	<b>53</b>
	<b>ENCLOURE.....</b>	<b>55</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	<i>Active Noise Cancelling</i> .....	8
<b>Gambar 2.2</b>	<i>Feedforward</i> ANC.....	9
<b>Gambar 2.3</b>	<i>Feedforward</i> ANC dengan $P = P_1 / P_2$ .....	9
<b>Gambar 2.4</b>	Ilustrasi Datangnya Derau Menuju Mikrofon.....	10
<b>Gambar 2.5</b>	Penjumlahan Vektor antara Derau dan Anti Derau.....	11
<b>Gambar 2.6</b>	Kontroler Adaptif untuk ANC .....	12
<b>Gambar 2.7</b>	Kontroler Adaptif untuk Sistem ANC .....	13
<b>Gambar 2.8</b>	Sistem Identifikasi Menggunakan Filter Adaptif.....	14
<b>Gambar 2.9</b>	Penghapusan Interferensi Menggunakan Filter Adaptif.....	15
<b>Gambar 2.10</b>	Filter <i>Transversal (direct)</i> .....	16
<b>Gambar 2.11</b>	Blok Diagram Filter <i>Wiener</i> .....	17
<b>Gambar 2.12</b>	Tampilan Antar Muka MATLAB 2013b.....	22
<b>Gambar 2.13</b>	Tampilan Antar Muka Simulink MATLAB 2013b.....	23
<b>Gambar 3.1</b>	Blok Diagram <i>Feedforward</i> FxLMS .....	26
<b>Gambar 3.2</b>	<i>Over-Ear Headphone</i> .....	27
<b>Gambar 3.3</b>	Rangkaian MAX9812 .....	28
<b>Gambar 3.4</b>	Ilustrasi Pengambilan Data Jalur Primer .....	29
<b>Gambar 3.5</b>	Ilustrasi Pengambilan Data Jalur Sekunder .....	30
<b>Gambar 3.6</b>	Analisis Spektra <i>Welch</i> dari Jalur Primer .....	32
<b>Gambar 3.7</b>	Filter FIR <i>Lowpass Equiripple</i> orde 20 .....	32
<b>Gambar 3.8</b>	Analisis Spektra <i>Welch</i> dari Jalur Sekunder .....	33
<b>Gambar 3.9</b>	Filter FIR <i>Bandpass Equiripple</i> orde 20.....	34
<b>Gambar 3.10</b>	<i>Flowchart</i> dari algoritma LMS .....	35
<b>Gambar 3.11</b>	Filter Adaptif LMS di Simulink .....	36
<b>Gambar 3.12</b>	Subsistem Berisi <i>Unit Delay</i> .....	37
<b>Gambar 3.13</b>	Algoritma LMS pada Simulink.....	37
<b>Gambar 3.14</b>	Penambahan Jalur Primer dan Jalur Sekunder.....	38
<b>Gambar 4.1</b>	Simulasi FWANC dengan Sinyal Uji <i>White Noise</i> .....	41
<b>Gambar 4.2</b>	Simulasi Sinyal Uji <i>White Noise</i> .....	42
<b>Gambar 4.3</b>	<i>Error</i> Sinyal Uji <i>White Noise</i> .....	42
<b>Gambar 4.4</b>	Analisis Spektra Sinyal Uji <i>White Noise</i> .....	43
<b>Gambar 4.5</b>	Simulasi dengan Sinyal Uji <i>Pink Noise</i> .....	43
<b>Gambar 4.6</b>	Hasil Simulasi Sinyal Uji <i>Pink Noise</i> .....	44
<b>Gambar 4.7</b>	<i>Error</i> Sinyal Uji <i>Pink Noise</i> .....	45
<b>Gambar 4.8</b>	Analisis Spektra Sinyal Uji <i>Pink Noise</i> .....	45



<b>Gambar 4.9</b>	Simulasi dengan Sinyal <i>Engine Sound</i> .....	46
<b>Gambar 4.10</b>	Simulasi Sinyal <i>Engine Sound</i> dengan $\mu = 0,02$ .....	47
<b>Gambar 4.11</b>	<i>Error</i> Sinyal <i>Engine Sound</i> dengan $\mu = 0,02$ .....	47
<b>Gambar 4.12</b>	Simulasi Sinyal <i>Engine Sound</i> dengan $\mu = 0,5$ .....	48
<b>Gambar 4.13</b>	<i>Error</i> Sinyal <i>Engine Sound</i> dengan $\mu = 0,5$ .....	48
<b>Gambar 4.14</b>	Analisis Spektra Sinyal <i>Engine Sound</i> .....	49



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Satuan dari Intensitas Suara .....	6
<b>Tabel 3.1</b> Spesifikasi MDR-ZX 310 .....	27

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Derau tidak lain hanyalah bunyi yang tidak diinginkan [1]. Derau dapat didengar bagi orang yang menggunakan *headphone* baik untuk alat komunikasi ataupun mendengarkan musik sebagai bunyi yang mengganggu. Derau yang kita rasakan ketika menggunakan *headphone* dapat kita jumpai pada kehidupan sehari-hari seperti suara mesin atau kendaraan. Bahkan derau yang destruktif dapat berbahaya bagi kesehatan pendengarnya, mengingat derau ini pasti terdengar oleh telinga manusia jika telinga tidak dilindungi. Terutama derau yang memiliki frekuensi rendah, metode pasif berupa *earmuff* pada *headphone* belum mampu meredam derau dengan baik. Sehingga sistem *active noise cancelling* (ANC), di mana mampu melemahkan derau yang memiliki frekuensi rendah, menjadi salah satu teknik yang sering digunakan untuk mendesain *headphone* sehingga dapat melindungi pendengarnya dari bahaya derau.

Tugas akhir ini menjelaskan rancangan ANC *headphone*. Algoritma *least mean square* digunakan untuk pembobotan koefisien pada filter. Karena pada *headphone* terdapat jalur di mana keluaran *loudspeaker* memasuki *error* mikrofon, jalur kedua (*secondary path*) perlu dipertimbangkan dalam perancangan. Sehingga sinyal derau,  $d$ , yang masuk mikrofon dengan sinyal anti *noise* yang berasal dari *loudspeaker*. Sumber derau,  $x$ , sebagai referensi perlu difilter menyesuaikan pemodelan dari jalur antara *loudspeaker* dan mikrofon. *Filtered x least mean square* diajukan sebagai metode yang digunakan untuk merancang ANC *headphone*.

### 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini adalah derau dari luar *headphone* dapat menembus *headphone* dan masuk ke telinga pendengar. Derau yang masuk perlu diredam menggunakan *active noise cancelling*.

### 1.3 Batasan Masalah

Permasalahan pada tugas akhir ini dibatasi oleh beberapa faktor yang diantaranya adalah:



- a. Derau yang ingin dihapus adalah derau yang memiliki frekuensi rendah.
- b. Frekuensi *sampling* yang digunakan sebesar 8000 Hz, sehingga sinyal informasi suara diperoleh sebesar 0-4000 Hz yakni setengah kali frekuensi *sampling*.
- c. Penggunaan sistem *Active Noise Cancelling* dengan struktur *feedforward*.
- d. Metode adaptasi menggunakan *filtered x least mean square*.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari pelaksanaan tugas akhir ini adalah:

- a. Memodelkan *headphone* dalam bentuk jalur primer dan jalur sekunder untuk keperluan simulasi ANC.
- b. Penerapan *Active Noise Cancelling* berdasarkan metode *filtered x least mean square* yang dilakukan melalui MATLAB dan *Simulink*.

Hasil dari penelitian dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan kontribusi untuk perkembangan *active noise cancelling headphone* di Indonesia baik dari bidang pendidikan maupun industri.

#### 1.5 Sistematika Penulisan

Buku tugas akhir ini terdiri dari lima bab dan disusun menurut sistematika penulisan sebagai berikut

##### BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, sistematika penulisan, dan relevansi.

##### BAB 2: DASAR TEORI

Bab ini berisi tentang teori yang menunjang penelitian, berupa teori tentang derau, filter adaptif, serta metode yang digunakan untuk penghapusan derau aktif melalui *filtered x least mean square*.

##### BAB 3: PERANCANGAN SISTEM

Bab ini berisi tentang perancangan perangkat keras, perangkat lunak, dan algoritma dari metode yang diajukan.

##### BAB 4: SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini berisi tentang hasil simulasi dan analisisnya.

## BAB 5: PENUTUP

Berisi kesimpulan dan saran berdasarkan hasil dari penelitian pada tugas akhir.

### 1.6 Relevansi

Hasil dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam pengembangan penelitian tentang *ANC Headphone* khususnya struktur ANC yang berdasarkan pada *Feedforward* ANC melalui metode FxLMS.

## BAB 2 DASAR TEORI

### 2.1 Derau dan Pendengaran [1]

Derau tidak lain hanyalah bunyi yang tidak diinginkan. Derau (*noise*) adalah suatu sinyal gangguan yang bersifat akustik yang hadir dalam kehidupan manusia sebagai bentuk gangguan yang bukan merupakan bunyi yang diinginkan. Sebagai contoh, percakapan dari orang lain bisa disebut dengan derau bagi orang yang tidak terlibat dalam percakapan. Keramaian di tempat perbelanjaan, suara mesin di industri, suara kendaraan di jalan, dan segala suara yang tidak diinginkan kehadirannya disebut dengan derau.

Derau dapat berbahaya bagi kesehatan manusia. Manusia yang mendengarkan derau secara rutin dengan kenyaringan tertentu secara terus menerus akan berkurang kemampuan pendengarannya. Jika derau ini tidak diatasi akan menyebabkan ketulian pada telinga. Selain itu telinga manusia akan selalu mendeteksi derau tersebut secara otomatis jika telinga tidak dilindungi.

Pendengaran adalah kemampuan makhluk hidup untuk menerima suara dengan mendeteksi getaran dan perubahan tekanan dari medium sekitar terhadap waktu yang masuk ke dalam organ tubuh makhluk hidup atau telinga. Suara dapat didengar melalui zat padat, cair maupun gas. Pendengaran termasuk dari lima panca indera manusia. Pada makhluk hidup lain pendengaran terjadi pada sistem auditori. Gelombang mekanik yang diterima oleh telinga kemudian diteruskan pada saraf impuls sehingga dapat mencapai otak.

Tabel 2.1 menjelaskan hubungan antara intensitas suara dan kenyaringan suara. Secara umum intensitas suara diekspresikan melalui skala logaritmik, atau biasa disebut dengan *decibel SPL (Sound Power Level)*. Pada skala ini, 0 dB SPL adalah daya gelombang suara sebesar  $10^{-16}$  watts/cm<sup>2</sup>, Intensitas suara terkecil yang dapat didengar oleh telinga manusia. Percakapan manusia adalah berkisar antara 60 dB SPL, sedangkan intensitas suara yang dapat menyakiti telinga manusia adalah 140 dB SPL. Perbedaan antara suara terkeras dengan suara terkecil yang dapat didengar oleh manusia adalah 120 dB. Pendengar dapat merasakan perubahan dari kenyaringan suara jika kenyaringan suara bertambah atau berkurang sebesar 1 dB. Dengan kata lain ada 120 tingkat kenyaringan suara yang dapat diterima oleh manusia [2].



**Tabel 2.1** Satuan dari Intensitas Suara [2]

Watts/cm <sup>2</sup>	Decibels SPL	Keterangan
$10^{-2}$	140	Menyakitkan
$10^{-3}$	130	
$10^{-4}$	120	Tidak nyaman
$10^{-5}$	110	Konser
$10^{-6}$	100	
$10^{-7}$	90	Derau dari industri
$10^{-8}$	80	
$10^{-9}$	70	
$10^{-10}$	60	Percakapan normal
$10^{-11}$	50	
$10^{-12}$	40	Dapat didengar sekurang-kurangnya 100Hz
$10^{-13}$	30	
$10^{-14}$	20	Dapat didengar sekurang-kurangnya 10kHz
$10^{-15}$	10	
$10^{-16}$	0	Dapat didengar sekurang-kurangnya 3kHz
$10^{-17}$	-10	
$10^{-18}$	-20	

Frekuensi yang dapat diterima oleh manusia disebut dengan audiosonik. Rentang frekuensi dari audiosonik adalah antara 20 Hz dan 20000 Hz, meskipun sebenarnya rentang frekuensi yang dapat didengar oleh masing-masing individu dapat berbeda akibat dari pengaruh lingkungan. Manusia secara umum dapat merasakan (dari pada disebut mendengar) frekuensi di bawah 20 Hz jika vibrasi cukup kuat. Sedangkan untuk frekuensi tinggi dapat didengar oleh sebagian orang muda. Rentang pendengaran akan semakin berkurang bagi masing-masing individu seiring dengan semakin bertambahnya umur.

Meskipun rentang suara yang dapat didengar oleh manusia berkisar antara 20 Hz sampai dengan 20 kHz, telinga manusia paling sensitif pada suara yang memiliki frekuensi antara 1 kHz sampai dengan 4 kHz. Sebagai contoh, pendengar dapat mendengar suara yang memiliki intensitas suara sebesar 0 dB SPL pada 3 kHz namun pendengar dapat mendengar suara yang memiliki intensitas suara sebesar 40 dB SPL pada 100 Hz.

## 2.2 *Passive Noise Cancelling* [3]

Derau dari lingkungan yang tidak diinginkan dapat menginterferensi dan terkadang menahan suara yang masuk melalui *headphone*, sehingga dapat mengganggu pengguna *headphone*. Untuk mengendalikan derau yang tidak diinginkan tersebut dapat digunakan

metode konvensional seperti penghapusan derau pasif dengan menggunakan material umum yang terdapat pada penutup *loudspeaker headphone*.

*Passive Noise Cancellation* (PNC) adalah desain fisik dari *headphone* yang mampu meredam derau yang berasal dari zona luar *loudspeaker headphone*. PNC sangat bergantung pada bentuk dari *earcup* dan *earmuff headphone* dalam kemampuannya untuk mengatasi derau.

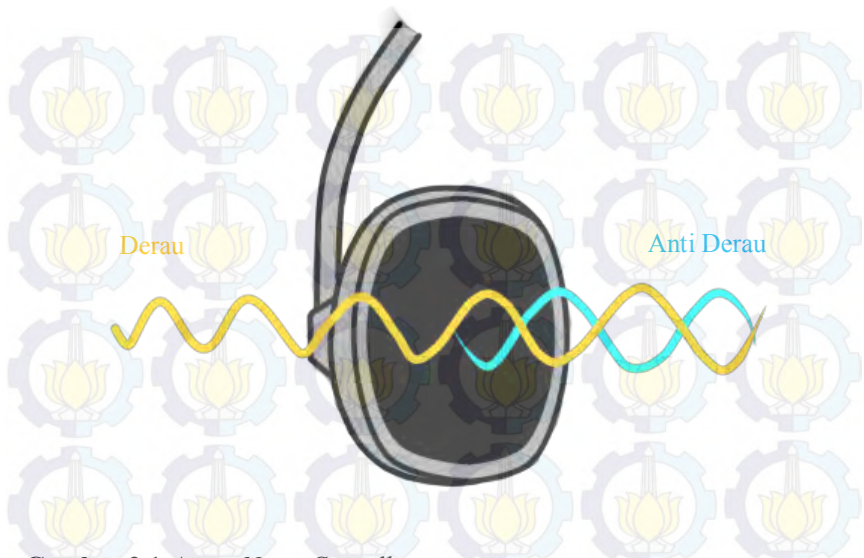
### 2.3 Active Noise Cancelling [4]

Metode konvensional tidak mampu untuk mengendalikan derau yang memiliki frekuensi rendah sehingga digunakan penghapusan derau aktif untuk mengatasi permasalahan tersebut.

ANC menggunakan prinsip dari *anti-phase noise cancellation* di mana menggunakan derau untuk menghapus derau. ANC dapat memanipulasi ruang akustik dengan memperkenalkan anti *noise* yang memiliki magnitudo yang sama namun dengan fasa yang berbeda sebesar  $180^\circ$ . ANC membangkitkan suara interferensi yang destruktif untuk derau yang tidak diinginkan, kemudian menghapus (meredam) derau sehingga secara ideal derau menjadi hilang.

Desain dari ANC *headphone* terdiri dari mikrofon dan *loudspeaker* yang secara elektronik membangkitkan suara penghapus derau. Sumber derau akustik yang memiliki karakteristik *time varying*, Frekuensi, amplitudo, fasa, dan kecepatan suara dari derau yang tidak statis, sehingga sistem ANC harus adaptif menghadapi variasi permasalahan derau.

Teknologi ANC sendiri dibagi menjadi berbagai macam jenis, yakni dilihat dari apakah ANC menggunakan sistem analog atau digital, dan juga dapat dilihat dari struktur kontrolnya, *feedforward* atau *feedback*. Struktur *feedforward* memiliki keunggulan seperti *dead time* yang lebih kecil namun memiliki kelemahan seperti lebih lemah interfransinya pada suara akustik. Sedangkan struktur *feedback* memiliki keunggulan seperti lebih kuat pada suara akustik namun memiliki kelemahan seperti terbatasnya kestabilan terhadap lebar pita dari frekuensi yang diolah. Bergantung pada kebutuhannya, masing-masing struktur ANC dapat digunakan sebagai dasar untuk menyusun sistem ANC dan dikembangkan dengan metode-metode adaptasi atau filter adaptif yang sudah ada.



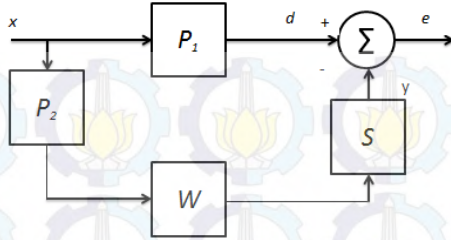
**Gambar 2.1** *Active Noise Cancelling*

### 2.3.1 *Feedforward ANC*

Sistem *feedforward* ANC menggunakan derau referensi sebagai masukan dari kontrolernya. Kemudian kontroler mengubah sinyal sehingga sinyal keluaran memiliki amplitudo yang sama namun fasa yang berbeda dengan derau referensi. Kemudian sinyal keluaran kontroler melalui jalur sekunder dan interferensi antara derau dan sinyal anti *noise* terjadi di zona akustik.

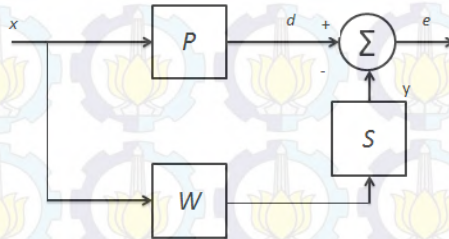
Blok diagram dari *feedforward* ANC dapat dilihat pada Gambar 2.2. Derau  $x$  dari lingkungan menembus *earcup headphone* dan mencapai telinga pengguna menghasilkan derau primer  $d$  melalui jalur primer  $P_1$  (*primary path*). Di sisi lain, referensi dari derau ditangkap dari luar (yakni derau  $x$ ) *headphone* melalui jalur transfer  $P_2$ . Derau referensi yang ditangkap diumpan ke depan (*feedforward*) melalui kontroler  $W$ . Keluaran dari kontroler adalah hasil dari pembangkitan sinyal anti *noise*  $y$  oleh *loudspeaker headphone* melalui jalur sekunder (*secondary path*). Di dalam *earcup* adanya derau primer  $d$  dan anti *noise*  $y$  menghasilkan derau residu atau *error* residu ANC  $e$ .





**Gambar 2.2** *Feedforward* ANC

Jalur primer diasumsikan menjadi  $P = P_1/P_2$  untuk menyederhanakan blok diagram seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



**Gambar 2.3** *Feedforward* ANC dengan  $P = P_1 / P_2$

Performa dari sistem ANC dapat diekspresikan melalui fungsi sensitivitas seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (2.1).

$$T(j\omega) = E(j\omega)/D(j\omega) \quad (2.1)$$

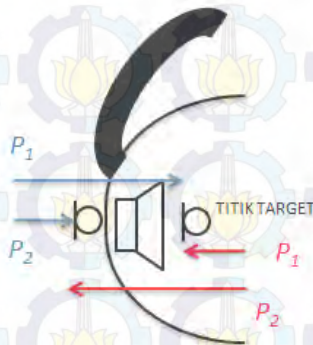
Di mana Persamaan (2.1) bergantung pada *error* residu dari derau primer pada domain frekuensi. Untuk kontroler *feedforward* fungsi sensitivitas ANC dapat dituliskan melalui Persamaan (2.2)

$$T = \frac{XP - XWS}{XP} = 1 - w \frac{S}{P} \quad (2.2)$$

Jika derau sekunder atau anti *noise*  $y$  nilainya mendekati derau primer  $d$ , superposisi destruktif kedua sinyal menghasilkan *error* yang kecil. Hal ini terjadi jika  $W(j\omega)$  nilainya mendekati jalur primer  $P(j\omega)$  dan mengkompensasi jalur sekunder  $S(j\omega)$ . Kontroler ideal menjadi  $W_{opt}(j\omega) = P(j\omega)/S(j\omega)$ .

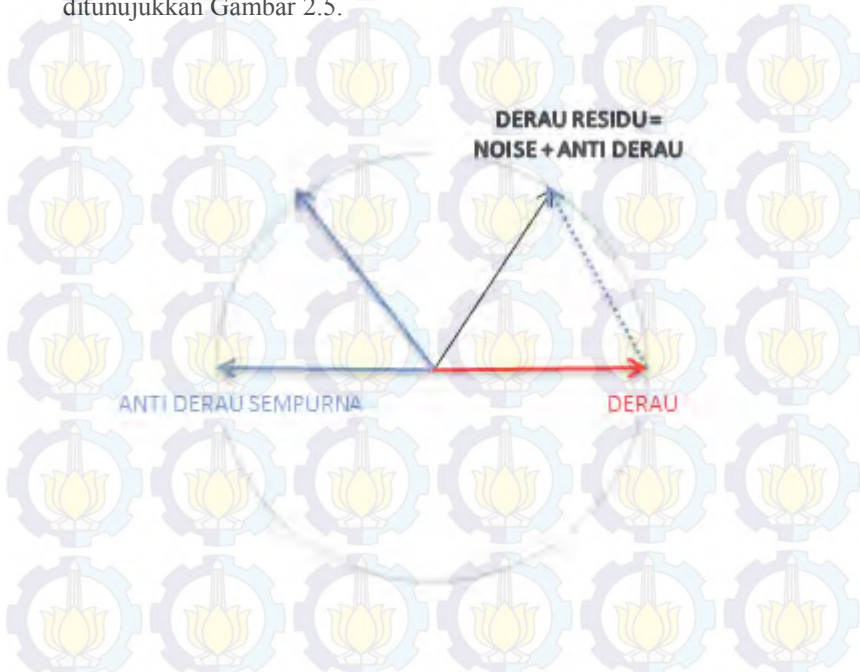
Baik jalur primer  $P(j\omega)$  dan jalur sekunder  $S(j\omega)$  adalah fungsi alih yang masih belum jelas titik targetnya. Maksud dari titik target ini adalah posisi ideal dari *error* mikrofon sistem ANC. ANC menjadi lebih efektif jika semakin dekat titik target dengan kepala manusia. Grup tunda dari  $S(j\omega)$  akan semakin meningkat seiring dengan semakin jauhnya titik target dengan *loudspeaker*. Hubungan antara  $W_{opt}(j\omega)$ ,  $P(j\omega)/S(j\omega)$  tetap kausal jika dan hanya jika grup tunda dari  $P(j\omega)$  lebih besar dari grup tunda dari  $S(j\omega)$ .

Gambar 2.4 menunjukkan berbagai macam kemungkinan yang terjadi untuk sistem ANC akibat dari datangnya derau dari arah yang berbeda. Jika derau datang dari sisi mikrofon luar maka grup tunda dari  $P_1$  lebih besar dari grup tunda dari  $P_2$  dan jalur primer  $P = P_1/P_2$  adalah kausal. Jika derau datang dari sisi sebaliknya, grup tunda dari  $P_1$  lebih pendek dari grup tunda dari  $P_2$  dan  $P$  menjadi nonkausal. Sehingga hubungan kausal  $W_{opt}(j\omega) = P(j\omega)/S(j\omega)$  menjadi tidak selalu terjadi dan harus selalu menjaga titik target untuk tetap dekat dengan *loudspeaker* untuk mencegah keadaan nonkausal dari  $W_{opt}(j\omega)$



**Gambar 2.4** Ilustrasi Datangnya Derau Menuju Mikrofon

Selain itu, dikarenakan ANC diperlukan khususnya untuk derau yang memiliki frekuensi rendah (100 Hz -1000 Hz), di mana panjang gelombang dan zona superposisi destruktif adalah besar, kita asumsikan bahwa magnitudo dari anti *noise* adalah sama dengan magnitudo dari derau maka superposisi destruktif adalah sama panjangnya dengan *error* fasa antara derau dengan anti *noise* nya, yakni dibawah  $60^0$  seperti yang ditunjukkan Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Penjumlahan Vektor antara Derau dan Anti Derau

Perbedaan fasa  $60^0$  sesuai dengan seperenam dari panjang gelombang, dan pada frekuensi 1000 Hz, seperenam panjang gelombang adalah 6 cm lebih besar dari panjang kanal telinga yang panjangnya mendekati 2,5 cm. sehingga jarak antara titik target dan gendang telinga menjadi tidak relevan.

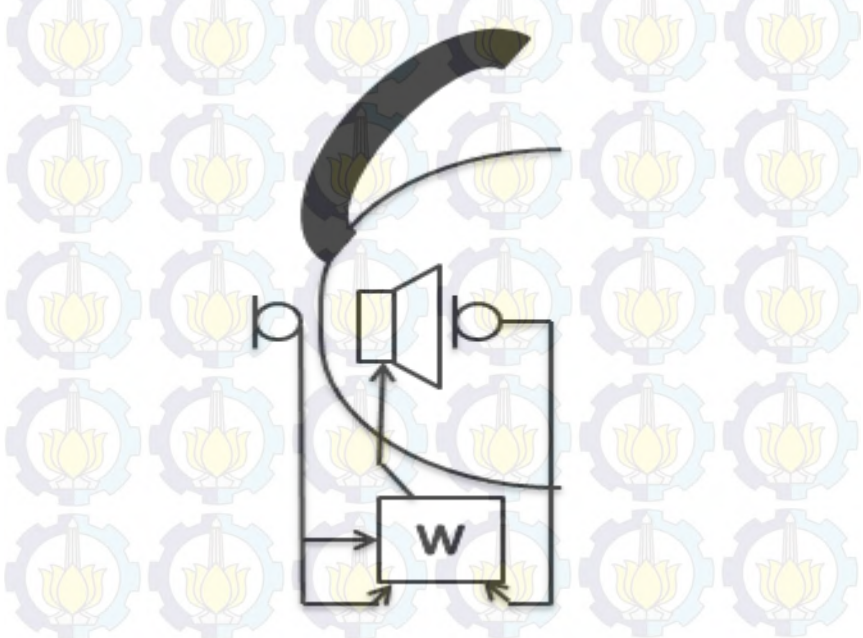
Satu hal lagi yang perlu diingat adalah invertibilitas dari  $S(j\omega)$ . Pengaruh titik target telah dilakukan penelitian. Sang peneliti menunjukkan bahwa titik target yang terbaik berada pada posisi dekat



serong telinga di mana sistem menunjukkan repon frekuensi yang paling baik.

### 2.3.2 Adaptive Feedforward ANC

Kontroler *feedforward* optimal  $W_{opt}(j\omega)$  menjadi nonkausal akibat dari beberapa kondisi dari  $P(j\omega)$  dan  $S(j\omega)$ .  $W_{opt}$  menjadi tidak bisa direalisasikan. Untuk itu diperlukan kontroler adaptif yang mampu beradaptasi dengan derau yang berasal dari segala arah dan kondisi *headphone* di kepala. Untuk itu diperlukan tambahan sinyal kedua (yang diterima oleh mikrofon kedua) yakni suara di dalam *headphone* (di dalam *earcup*). Tambahan mikrofon kedua tersebut seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



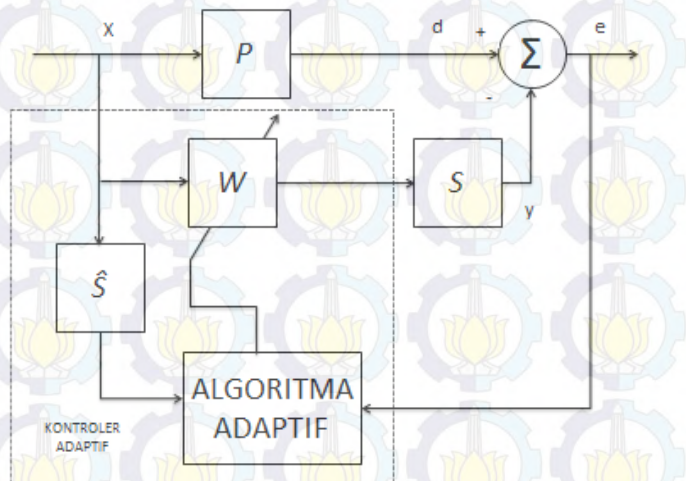
**Gambar 2.6** Kontroler Adaptif untuk ANC

Kontroler adaptif terdiri dari dua tingkat. Pertama filter adaptif dan kedua adalah algoritma yang digunakan untuk pembaharuan fungsi alih dari filter. Dengan asumsi bahwa sistem dinamik dapat dimodelkan

menjadi sistem linier, filter adaptif dapat direalisasikan melalui filter transversal (digital) dikarenakan dua aspek penting, yakni

1. Filter transversal dengan panjang filter yang mencukupi nilainya dapat mendekati respon impuls dari berbagai macam kondisi  $W(j\omega) = P(j\omega)/S(j\omega)$  selama energi dari respon impuls menghilang di waktu yang terhingga selama lebar pita  $W(j\omega)$  diantara  $f_s/2$ , dengan  $f_s$  adalah frekuensi *sampling*
2. Keluaran dari *finite impulse response* adalah tetap dalam batasan asalkan koefisien filter juga tetap dalam batasan.

Blok diagram dari kontroler adaptif untuk ANC dapat dilihat pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7** Kontroler Adaptif untuk Sistem ANC

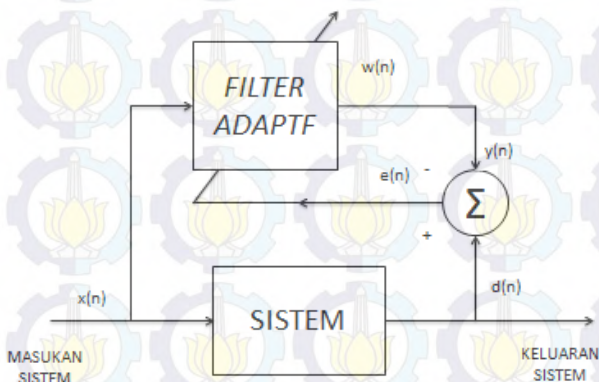
Algoritma yang digunakan untuk adaptasi koefisien filter adalah *least mean square* (LMS) berkat kemudahannya untuk diaplikasikan dan memerlukan komputasi yang tidak banyak. Algoritma LMS memerlukan sinyal *error*  $e$  dan sinyal referensi  $x$  yang mengakibatkan sinyal *error*.  $x$  ditunda dan difilter melalui model  $\hat{S}$  dari jalur sekunder. Adanya filter ini sehingga algoritma adaptasi disebut dengan *filtered x least mean square*

## 2.4 Aplikasi Filter Adaptif [5]

Karena begitu banyaknya kegunaan dari filter adaptif, aplikasi dari filter adaptif pada umumnya terdiri dari empat kelas. Namun akan dijelaskan dua diantara empat kelas saja mengingat tugas akhir hanya akan menggunakan kedua kelas ini.

### 2.4.1 Identifikasi Sistem

Identifikasi atau pemodelan diilustrasikan seperti pada Gambar 2.8. Pada aplikasi ini, filter adaptif menerima masukan  $x(n)$ , di mana filter menjadi sistem itu sendiri. Kemudian keluaran  $y(n)$  dari filter adaptif dibandingkan (melalui substraksi) keluaran  $d(n)$  sehingga menghasilkan *error*. *Error*  $e(n)$  tersebut digunakan sebagai pembobotan pada  $w(n)$  untuk meminimalkan *error*, sehingga sistem dapat diidentifikasi.



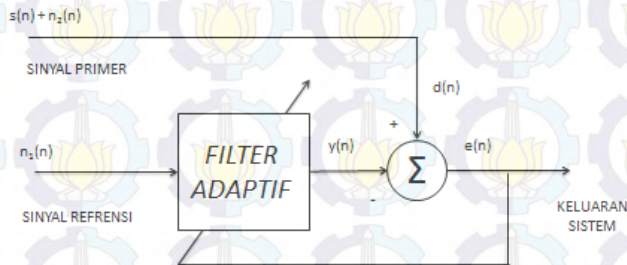
**Gambar 2.8** Sistem Identifikasi Menggunakan Filter Adaptif

### 2.4.2 Penghapusan Interferensi

Penghapusan interferensi merupakan aplikasi filter adaptif yang akan digunakan pada tugas akhir. Blok diagram penghapusan interferensi dapat dilihat pada Gambar 2.9.  $d(n)$  adalah derau primer (sinyal primer yang korup dengan sinyal derau). Kemudian dibandingkan dengan keluaran dari filter adaptif  $y(n)$ , yang menggunakan sinyal referensi  $n_1(n)$  di mana sumber derau yang menciptakan derau primer. Keluaran sistem  $e(n)$  adalah perbedaan



antara keluaran filter  $y(n)$  dan respon yang diinginkan  $d(n)$ . Hasil yang diinginkan adalah  $e(n)$  adalah sama dengan sinyal aslinya tanpa interferensi.



**Gambar 2.9** Penghapusan Interferensi Menggunakan Filter Adaptif

## 2.5 Filter Digital [6]

Filter sendiri memiliki dua peranan penting dalam pemrosesan sinyal, yakni pemisahan sinyal dan pemulihan sinyal. Pemisahan sinyal digunakan ketika sinyal informasi terkontaminasi oleh interferensi, derau, atau sinyal yang lain. Sedangkan pemulihan sinyal digunakan ketika sinyal terdistorsi dengan cara yang sama.

Filter digital sangat penting peranannya dalam pemrosesan sinyal digital. Salah satu alasan kenapa filter digital populer dikarenakan performa dari filter digital yang luar biasa baik. Filter digital mampu melakukan operasi matematik pada sinyal yang telah dicuplik (*discrete time*). Filter digital biasanya terdiri dari *analog to digital converter* (ADC) untuk mencuplik sinyal masukan, diteruskan oleh mikroprosesor dan beberapa komponen lainnya seperti penyimpanan data dan koefisien filter hingga yang terakhir *digital to analog converter* (DAC).

Setiap filter linier memiliki respon impuls, respon *step*, dan respon frekuensi. Setiap respon mengandung informasi lengkap dari filter, namun dalam bentuk yang berbeda. Jika salah satu respon telah diketahui spesifikasinya maka respon yang lain dapat dicari dan dihitung. Ketiga respon ini penting dalam representasi filter, mengingat respon dapat menjelaskan bagaimana filter beroperasi pada beberapa keadaan yang berbeda.

Filter dapat diimplementasikan melalui dua cara yakni secara langsung dan secara rekursif. Implementasi filter secara langsung dapat dilakukan dengan mengkonvolusi sinyal masukan dengan respon impuls dari filter digital. Hampir semua filter digital dapat diimplementasikan melalui cara ini. Filter rekursif biasa disebut dengan *Infinite Impulse Response* (IIR) sedangkan filter yang diimplementasikan melalui proses konvolusi biasa disebut dengan *Finite Impulse Response* (FIR)

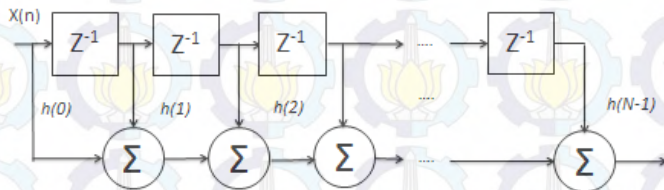
### 2.5.1 Filter FIR

*Finite Impulse Response* (FIR) filter, seperti yang disebutkan oleh namanya, memiliki respon impuls yang terhingga. Karakteristik filter dituliskan melalui Persamaan (2.3) dan Persamaan (2.4).

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) x(n-k) \quad (2.3)$$

$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) z^{-k} \quad (2.4)$$

Di mana  $h(k)$ ,  $k = 0, 1, \dots, N-1$ , adalah koefisien respon impuls dari filter,  $H(z)$  adalah fungsi alih dari filter dan  $N$  adalah jumlah koefisien dari filter, biasa disebut dengan panjang filter (*length*). Persamaan (2.3) adalah persamaan beda filter FIR. Persamaan tersebut menjelaskan filter pada bentuk nonrekursifnya, yakni keluaran  $y(n)$ , di mana tidak terpengaruh oleh nilai sebelumnya dari keluaran  $y(n)$ .



**Gambar 2.10** Filter Tansversal (*direct*)

ketika diimplementasikan pada bentuk nonrekursifnya, filter akan selalu stabil. Persamaan (2.4) adalah fungsi alih dari filter. Persamaan memungkinkan analisis dari filter dapat dilakukan. Gambar 2.10 menunjukkan blok diagram dari filter *transversal*.

### 2.5.2 Filter Wiener

Filter *wiener* adalah filter untuk estimasi statistik dari sinyal yang tidak diketahui. Untuk sistem waktu diskrit, keluaran  $y(n)$  dapat diekspresikan melalui Persamaan (2.5).

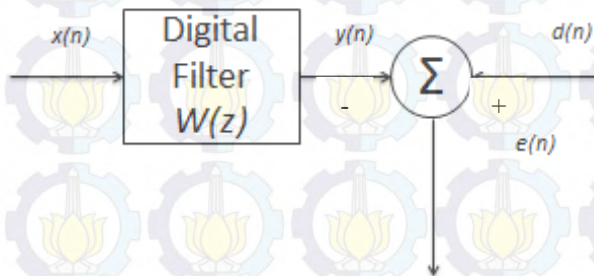
$$y(n) = \sum_{k=0}^{L-1} w(n) x(n-k) \quad (2.5)$$

Atau dapat diekspresikan melalui Persamaan (2.6).

$$y(n) = \bar{w}(n)^T \bar{x}(n) \quad (2.6)$$

Pada Persamaan (2.5),  $x(n-k)$  adalah sinyal masukan dan  $w$  adalah koefisien filter, sedangkan pada Persamaan (2.6),  $\bar{w}(n)$  dan  $\bar{x}(n)$  adalah vektor kolom dari  $x(n)$  dan  $w(n)$ . pada Persamaan (2.7),  $e(n)$  merepresentasikan perbedaan antara respon  $d(n)$  dan sinyal keluaran  $y(n)$ .

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.7)$$



**Gambar 2.11** Blok Diagram Filter *Wiener*



Fungsi biaya dapat didefinisikan melalui nilai ekspektasi dari kuadrat dari sinyal *error*  $e(n)$  yang diekspresikan melalui Persamaan (2.8).

$$J = E[e(n)e(n)] = E[e(n)^2] \quad (2.8)$$

Untuk mencari koefisien filter optimum yang meminimalkan fungsi biaya, gradien dari fungsi biaya diekspresikan melalui Persamaan (2.9) dengan memperhatikan koefisiennya dan disamakan dengan nol.

$$\nabla J = -2[\bar{x}(n)e(n)] \quad (2.9)$$

$$E[\bar{x}(n)e_*(n)] = 0 \quad (2.10)$$

Di mana  $e_*$  adalah notasi dari *error* minimum. Substitusi Persamaan (2.5) dan Persamaan (2.6) dengan Persamaan (2.10) menghasilkan Persamaan (2.11).

$$\bar{w}(n)^T E\{\bar{x}(n)^T \bar{x}(n)\} = E\{\bar{x}(n)d(n)\} \quad (2.11)$$

Di mana  $w$ , menotasikan vektor bobot optimum. Persamaan (2.11) dapat ditulis ulang melalui Persamaan (2.12).

$$R\bar{w}(n) = \bar{p} \quad (2.12)$$

Di mana  $R$  adalah matriks otokorelasi dari sinyal masukan dan  $\bar{p}$  adalah vektor korelasi silang dari sinyal masukan dan respon yang diinginkan. Persamaan (2.12) dikenal dengan persamaan *Wiener-Hopf*.  $\bar{w}(n)_*$  adalah vektor dari filter koefisien optimum yang meminimalkan nilai ekspektasi dari kuadrat dari sinyal *error* atau *mean squared error* (MSE).

## 2.6 Least Mean Square (LMS) [7]

Algoritma LMS meminimalkan MSE  $E[e(n)^2]$  dengan MSE adalah fungsi kuadratik dari pembobotan pada filter. Algoritma LMS adalah pendekatan dari metode *steepest descent* sebagai adaptasi

dari koefisien filter dengan arah gradien negatif dari fungsi biaya  $E[e(n)^2]$  yang dituliskan pada Persamaan (2.13).

$$w[n+1] = w[n] + \frac{1}{2}\mu(\nabla(E[e(n)^2])) \quad (2.13)$$

*Steepest descent* merupakan metode yang efektif untuk algoritma optimisasi, namun tidak memungkinkan untuk digunakan pada aplikasi *real time* dikarenakan pengaruh MSE. Untuk keperluan komputasi koefisien filter pada aplikasi *real time*, Persamaan (2.14) dimodifikasi dengan hanya menggunakan nilai MSE yang tetap membentuk Persamaan (2.14).

$$w[n+1] = w[n] + \frac{1}{2}\mu(\nabla J) \quad (2.14)$$

Di mana  $J$  menotasikan nilai tetap dari fungsi biaya dan  $\frac{1}{2}\mu$  adalah *gain* artifisial untuk mencegah divergensi. Gradien tetap dari fungsi biaya dapat dituliskan pada Persamaan (2.15) sebagai perkalian antara sinyal masukan dan sinyal *error*.

$$\nabla e(n)^2 = -2e[n]x[n] \quad (2.15)$$

Kemudian algoritma LMS dituliskan kembali melalui Persamaan (2.16).

$$w[n+1] = w[n] + 2\mu e[n]x[n] \quad (2.16)$$

atau

$$w[n+1] = w[n] + \mu e[n]x[n] \quad (2.17)$$

Pada banyak literatur, faktor skalar 2 merupakan satu kesatuan dengan *step size*  $\mu$ . Pada literatur dideduksikan bahwa konvergen dari LMS sama dengan kondisi konvergen yang dipaparkan pada algoritma dari *steepest descent*.

*Gain*  $\mu$  harus memenuhi kondisi dari konvergensinya seperti yang tertera pada Persamaan (2.18).

$$0 < \mu < \frac{2}{\lambda_{max}} \quad (2.18)$$

Di mana  $\lambda_{max}$  adalah *eigenvalue* terbesar dari matriks otokorelasi dari sinyal derau.

## 2.7 Filtered $x$ Least Mean Square [8]

Adanya jalur sekunder pada kontroler LMS menyebabkan ketidakstabilan pada sistem. Hal ini dikarenakan waktu dari sinyal *error* tidak sesuai dengan waktu sinyal referensi, karena adanya model  $S$ . Terdapat dua cara untuk menghilangkan pengaruh dari adanya jalur sekunder tersebut. Cara pertama adalah dengan menempatkan *inverse* dari filter, yakni  $1/S$ , seri dengan jalur  $S$  sehingga dapat menghilangkan efeknya. Cara kedua adalah dengan menempatkan filter yang identik pada jalur sinyal referensi sebelum pembaharuan bobot filter dari algoritma LMS, sehingga disebut dengan algoritma *filtered  $x$  least mean square*. Karena invers dari  $S$  tidak harus diperlukan untuk model  $S$ , FxLMS dapat digunakan sebagai cara pendekatan yang lebih efektif.

Penempatan fungsi alih jalur kedua sebelum filter digital  $W$  yang diperbaharui menggunakan LMS dapat dilihat pada Persamaan (2.20).

$$e(n) = d(n) - s(n) * [\bar{w}(n)^T \bar{x}(n)] \quad (2.20)$$

Di mana  $n$  adalah indeks waktu,  $s(n)$  adalah respon impuls dari jalur sekunder  $S$ ,  $*$  menotasikan konvolusi linier,  $w(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{L-1}(n)]^T$  dan  $x(n) = [x_0(n) \ x_1(n) \ \dots \ w_{n-L+1}(n)]$  adalah koefisien dan vektor sinyal  $W$ , dan  $L$  adalah orde filter. Filter  $W$  harus memiliki orde yang cukup untuk secara akurat memodelkan respon dari sistemnya.

Pada praktek dan aplikasi ANC,  $S(z)$  tidak diketahui dan harus diestimasi terlebih dahulu. Karenanya, sinyal referensi difilter untuk membangkitkan estimasi dari jalur sekunder yang dituliskan pada Persamaan (2.21)

$$x'(n) = \hat{s}(n) * \bar{x}(n) \quad (2.20)$$

Di mana  $\hat{s}(n)$  adalah estimasi dari respon impuls dari jalur sekunder  $S(z)$ .



Algoritma FxLMS sangat toleran terhadap *error* yang terjadi pada estimasi  $S(z)$ . Dengan kecepatan adaptasi yang lambat, algoritma mengalami konvergensi dengan *error* fasa mendekati  $90^0$  antara  $S(z)$  dan estimasinya. Pemodelan jalur sekunder memiliki pengaruh yang penting terhadap keseluruhan sistem ANC. Semakin akurat pemodelan dari jalur sekunder, semakin baik respon frekuensi yang yang dibangkitkan oleh ANC.

## 2.8 MATLAB [9]

MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah sebuah program untuk analisis dan komputasi numerik dan merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks.

Pada awalnya, program ini merupakan *interface* untuk koleksi rutin numerik dari proyek LINPACK dan EISPACK, dan dikembangkan menggunakan bahasa FORTRAN namun sekarang merupakan produk komersial dari perusahaan Mathworks, Inc. yang dalam perkembangan selanjutnya dikembangkan menggunakan bahasa C++ dan *assembler* (utamanya untuk fungsi-fungsi dasar MATLAB).

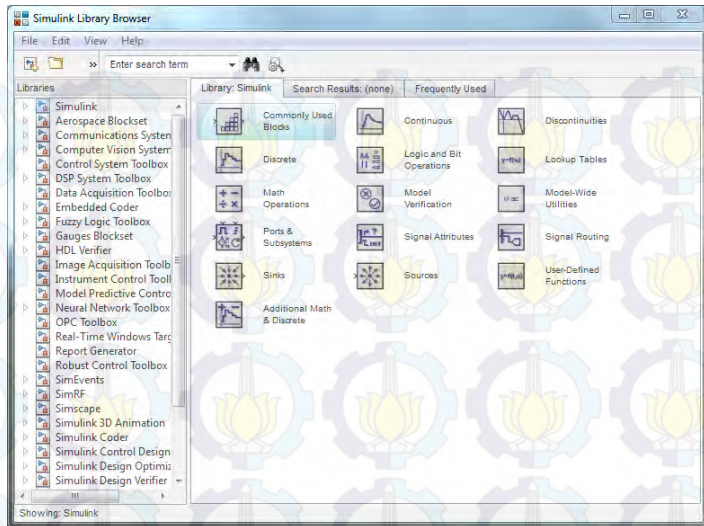
MATLAB telah berkembang menjadi sebuah *environment* pemrograman yang canggih yang berisi fungsi-fungsi *built-in* untuk melakukan tugas pengolahan sinyal, aljabar linier, dan kalkulasi matematis lainnya. MATLAB juga berisi *toolbox* yang berisi fungsi tambahan untuk aplikasi khusus.

MATLAB bersifat *extensible*, dalam arti bahwa seorang pengguna dapat menulis fungsi baru untuk ditambahkan pada *library* ketika fungsi-fungsi *built-in* yang tersedia tidak dapat melakukan tugas tertentu. Kemampuan pemrograman yang dibutuhkan tidak terlalu sulit bila seseorang telah memiliki pengalaman dalam pemrograman bahasa lain seperti C, PASCAL, atau FORTRAN.

MATLAB merupakan merk *software* yang dikembangkan oleh Mathworks, Inc. MATLAB merupakan *software* yang paling efisien untuk perhitungan numerik berbasis matriks. Dengan demikian jika di dalam perhitungan kita dapat menformulasikan masalah ke dalam format matriks maka MATLAB merupakan *software* terbaik untuk penyelesaian numeriknya. Sehingga MATLAB merupakan salah satu program perhitungan yang paling sering digunakan oleh seluruh dunia baik dalam bidang akademik maupun praktis.



Untuk Tugas Akhir *toolbox* Simulink yang sering digunakan adalah *DSP Systems Toolbox*. Pada *DSP Systems toolbox*, terdapat blok *noise* yang pada simulasi digunakan sebagai pembangkit sinyal *white noise*. Mengingat MATLAB 2013b belum memuat blok *Colored Noise*, program yang disusun pada MATLAB digunakan untuk membangkitkan sinyal *Pink Noise*. Kemudian sinyal yang dibuat dimasukkan ke dalam blok *from workspace* sebagai sinyal uji yang digunakan untuk simulasi. Melalui blok *workspace* pula sinyal suara mobil dijadikan untuk simulasi. Semua sinyal uji ini akan dijalankan pada program yang telah dibuat Simulink. Hasil dari jalannya simulasi diamati menggunakan blok *scope* dan disimpan pada *workspace*. Data hasil simulasi diplot ulang melalui perintah yang diberikan pada *command window* MATLAB.



**Gambar 2.13** Tampilan Antar Muka Simulink MATLAB 2013b



## BAB 3

### PERANCANGAN SISTEM

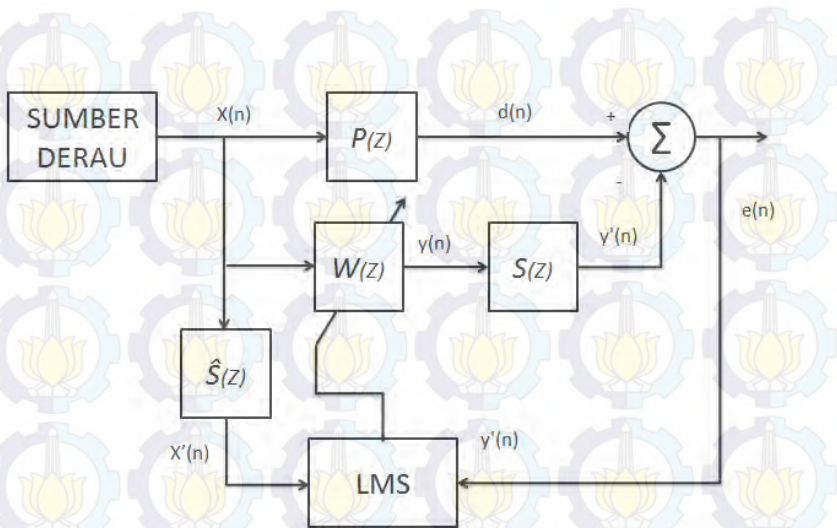
Setelah memahami dasar teori dari adaptif filter pada Bab 2, Pada Bab 3 akan dipaparkan mengenai perancangan dari sistem ANC *headphone*. Pertama akan dijelaskan gambaran umum sistem yang akan dirancang melalui ilustrasi dan blok diagram. Kemudian dilanjutkan pada perancangan perangkat keras dan perangkat lunak sebagai alat untuk pengambilan data. Lalu identifikasi sistem untuk memodelkan jalur primer dan jalur sekunder beserta prosedur eksperimen pengambilan datanya. Berikutnya dijelaskan secara rinci perancangan dari metode *filtered x least mean square*.

#### 3.1 Gambaran Umum Sistem

Sistem ANC berupa simulasi yang dilakukan melalui MATLAB dan Simulink. Sistem terdiri dari kontroler filter adaptif yang disusun melalui blok matematis dan *plant* jalur primer dan jalur sekunder yang dimodelkan melalui blok filter digital. Interferensi destruktif secara akustik digambarkan dengan hasil substraksi antara keluaran dari jalur primer dan keluaran dari jalur sekunder. Sinyal *error* menggambarkan suara yang terdengar oleh manusia.

Sistem ANC yang digunakan pada tugas akhir berdasarkan pada struktur *feedforward* dari sistem ANC seperti yang telah dibahas pada bab sebelumnya. Sistem ANC terdiri dari satu *headphone* dan dua mikrofon yang diletakkan di dalam *headphone* (dekat keluaran *loudspeaker*). Dengan mikrofon referensi di luar *headphone*. Mikrofon referensi mendeteksi sumber derau dan difilter oleh kontroler FANC.

Blok diagram yang ekuivalen dengan Gambar 3.1 Sumber derau  $x(n)$  menembus *earcup*  $P(z)$  (jalur primer) menghasilkan sinyal derau primer  $d(n)$ . Disisi lain sumber derau  $x(n)$  ditangkap oleh mikrofon referensi sebagai sinyal masukan dari kontroler  $W(z)$ . Keluaran sinyal  $y(n)$  mencapai titik penghapusan dan dibangkitkan melalui *loudspeaker*  $y'(n)$  yang disebut dengan jalur sekunder. Sinyal keluaran  $y'(n)$  menginterferensi secara destruktif dengan sinyal derau yang melalui jalur primer dan sinyal derau  $d(n)$  yang ingin diredam menghasilkan sinyal *error* yang ditangkap oleh *error* mikrofon.



**Gambar 3.1** Blok Diagram *Feedforward* FxLMS

### 3.2 Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras digunakan untuk pengambilan data dari pengaruh derau terhadap *headphone*. Nantinya data ini akan digunakan sebagai analisis spektra yang melalui *headphone*. Perangkat keras yang digunakan adalah *headphone* sebagai *plant* dan manekin yang ditambahkan mikrofon untuk keperluan pengukuran.

#### 3.2.1 *Headphone* Sony MDR-ZX310

Sony MDR-ZX310 adalah *over-ear headphone* yakni jenis *headphone* yang memiliki dua *loudspeaker* besar yang terhubung dengan sebuah bandana. Berbeda dengan *in-ear headphone* atau *earbud*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Pemakaian dari *headphone* tidak dipasang ke dalam telinga melainkan bandana dari *headphone* dipasang di kepala kemudian kedua *loudspeaker* ditempelkan pada kedua telinga. Berkat bandana, *loudspeaker* akan terpasang secara erat. Meskipun tertempel secara erat dengan telinga, telinga tidak akan sakit

dikarenakan pada *loudspeaker* telah terpasang busa sehingga telinga terasa nyaman saat menggunakannya.



**Gambar 3.2** *Over-Ear Headphone* [10]

**Tabel 3.1** Spesifikasi MDR-ZX 310

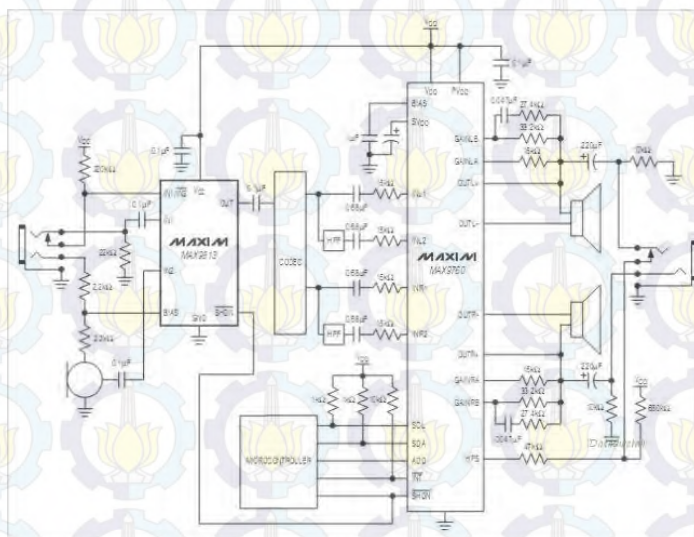
Spesifikasi	Keterangan
Berat	125g
Kapasitas	1000mW
Driver Unit	30mm
Respon Frekuensi	10-24000 Hz
Sensitivitas	98 dB/mW
Impedansi	24 ohm
<i>Cord</i>	<i>Y-type</i>
Panjang Kabel	1,2 m
<i>Plug</i>	<i>Gold-Plated L-Shaped stereo mini</i>

Spesifikasi dari SONY MDR-ZX310 ditunjukkan pada tabel 3.1. Respon frekuensi dari SONY MDR-ZX310 mampu mencakup seluruh rentang frekuensi yang dapat didengar oleh manusia. Impedansi 24 ohm menunjukkan MDR-ZX310 lebih kompatibel dengan peralatan elektronik portabel.



### 3.2.2 Mikrofon MAX9812 dan Manekin

Mikrofon MAX9812 digunakan untuk menangkap sinyal suara pada saat pengambilan data. MAX9812 merupakan modul yang terdiri dari mikrofon dan amplifier. Jenis mikrofon yang digunakan adalah mikrofon elektret. Mikrofon elektret adalah salah satu jenis mikrofon yang berdasarkan kapasitor elektrostatis di mana mikrofon dapat digunakan tanpa mempedulikan polaritas dari *power supply*. Mikrofon elektret yang digunakan memiliki respon frekuensi antara 20-20 kHz. Untuk *amplifier* digunakan *chip* yang sudah didesain untuk menguatkan mikrofon elektret di mana kenyaringan suara tidak dapat diprediksi. *Gain* maksimal secara *default* sebesar 60 dB, namun dapat diatur ulang menjadi 40 dB atau 50 dB dengan menghubungkan pin *gain* menuju *Vcc* atau *ground*. *Output* dari amplifier adalah sekitar 2 *Vpp max* pada 1,25 VDC, sehingga dapat digunakan dengan mudah oleh berbagai macam konverter digital atau analog yang memiliki masukan hingga 3,3 VDC. Skematik Rangkaian ditunjukkan pada Gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Rangkaian MAX9812 [11]

Manekin pada tugas akhir ini adalah sebuah replika kepala manusia. Manekin digunakan untuk tempat pemasangan *headphone*

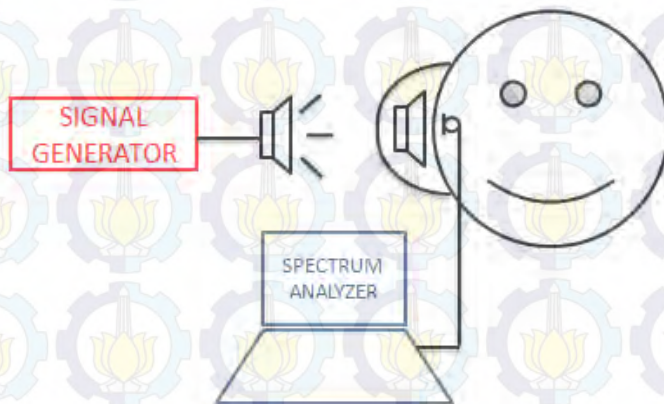
sebagai ganti kepala manusia yang sebenarnya. Gambar manekin dapat dilihat pada lampiran nomor tiga.

Manekin yang digunakan adalah manekin komersial yang telah dimodifikasi. Modifikasi yang dilakukan berupa pemasangan mikrofon MAX9812 pada kedua telinga manekin. Kemudian keluaran dari MAX9812 dihubungkan dengan komputer (laptop) melalui *jack* audio. Komputer kemudian akan mengolah sinyal suara melalui perangkat lunak dan analisis spektrum dilakukan melalui *software* MATLAB.

### 3.3 Prosedur Eksperimen

Terdapat dua percobaan yang dilaksanakan pada tugas akhir ini, yakni, pengambilan data untuk jalur primer dan pengambilan data untuk jalur sekunder.

#### 3.3.1 Pengambilan Data Jalur Primer

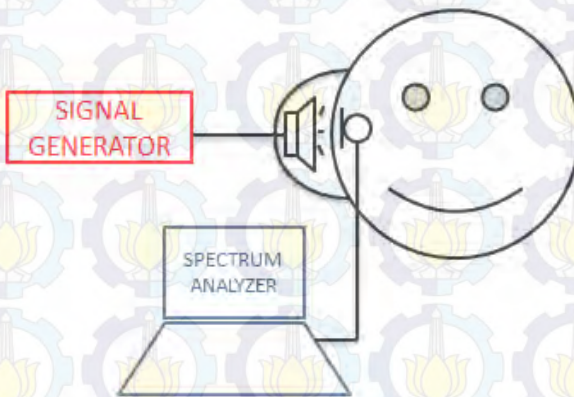


**Gambar 3.4** Ilustrasi Pengambilan Data Jalur Primer

- Atur manekin, *headphone*, dan *loudspeaker* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.
- Mikrofon untuk mengambil data tertanam pada manekin dan keluaran mikrofon dihubungkan dengan laptop yang terinstall MATLAB sebagai *software* perekam suara.

- c. *Loudspeaker* sebagai sumber derau dengan masukan berasal dari keluaran audio laptop melalui *white noise* yang dibangkitkan melalui *software* MATLAB.
- d. Atur posisi *headphone* sehingga *headphone* terpasang erat di kepala manekin.
- e. Proses perekaman suara dilaksanakan dengan menuliskan program pada *command window* MATLAB.
- f. Data tersimpan pada *workspace* MATLAB.

### 3.3.2 Pengambilan Data Jalur Sekunder



**Gambar 3.5** Ilustrasi Pengambilan Data Jalur Sekunder

- a. Atur manekin, *headphone*, dan *loudspeaker* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.5.
- b. Mikrofon untuk mengambil data tertanam pada manekin dan keluaran mikrofon dihubungkan dengan laptop yang terinstall MATLAB sebagai *software* perekam suara.
- c. *Headphone* sebagai keluaran sinyal eksitasi dengan masukan *white noise* yang terhubung dengan audio laptop melalui *signal generator* yang dibangkitkan melalui *software* MATLAB.
- d. Atur posisi *headphone* sehingga *headphone* terpasang erat di kepala manekin.
- e. Proses perekaman suara dilaksanakan dengan menuliskan program pada *command window* MATLAB.
- f. Data tersimpan pada *workspace* MATLAB.



### 3.4 Perancangan Perangkat Lunak MATLAB

Pada tugas akhir, perangkat lunak diperlukan untuk pengambilan data, pemrosesan sinyal, dan pengiriman data. Analisis spektra untuk menganalisis karakteristik sinyal menggunakan MATLAB dan Simulink. MATLAB dan Simulink disediakan di dua komputer yang berbeda, satu untuk simulasi algoritma *filtered x least mean square* dan satu lagi untuk analisis spektra untuk pengambilan data.

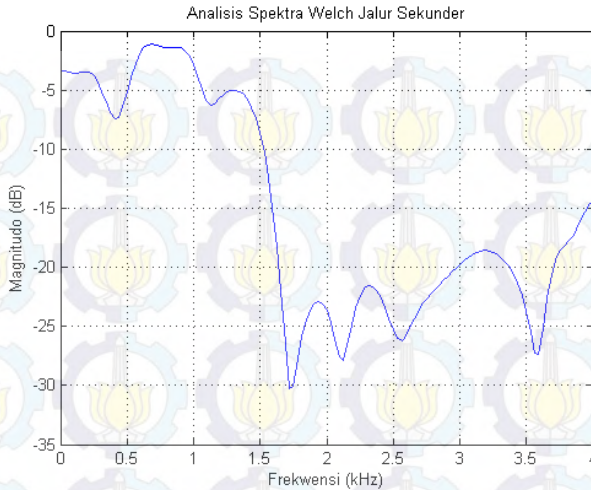
Perangkat lunak digunakan sebagai antarmuka antara mesin dan pengguna, biasa disebut *Human Machine Interface* (HMI). HMI yang digunakan pada tugas akhir ini adalah MATLAB 2013b. Perangkat lunak ini digunakan pada proses pengambilan data dan pengiriman data. Dengan menggunakan perintah *audiorecorder*, *record*, dan *stop* pada *command window* MATLAB, pengambilan data dapat dilakukan dan disimpan pada *workspace* MATLAB. Selain menggunakan *command window*, Simulink MATLAB digunakan untuk keperluan simulasi dari program ANC yang telah dibuat. Dengan menggunakan *audio input/output*, Simulink MATLAB dapat mengolah data dari blok *from audio device* dan mengirimkannya kembali melalui blok *to audio device*.

### 3.5 Pemodelan Sistem

#### 3.5.1 Analisis Spektra Welch Jalur Primer

Derau yang ditangkap pada mikrofon bergantung pada atenuasi pasif dari *headphone*. Atenuasi pasif sendiri bergantung pada kerapatan pada pemakaian *headphone* di kepala dan arah dari sumber deraunya. Pada penelitian kali ini pasif atenuasi diukur dengan kondisi kerapatan dan arah yang tetap. Atenuasi pasif dievaluasi melalui hubungan antara *sound pressure level*  $P_{in}$  di dalam *earcup* dan SPL  $P_{out}$  di luar *earcup*. Sehingga  $P = P_{in}/P_{out}$

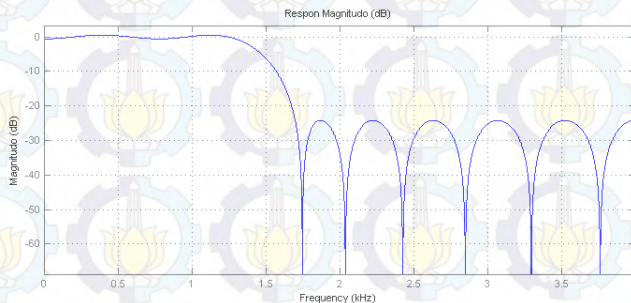
Pengukuran dilakukan dengan *headphone* yang dipasangkan pada manekin. Kemudian sumber derau dibangkitkan melalui *loudspeaker* yang diletakkan sejauh 5 cm dari posisi manekin. Jumlah *loudspeaker* pada percobaan sebanyak dua buah yang masing-masing diletakkan di sebelah kanan dan kiri manekin. Hasil analisis ditunjukkan pada Gambar 3.6.



**Gambar 3.6** Analisis Spektra *Welch* dari Jalur Primer

### 3.5.2 Pemodelan Filter FIR Jalur Primer

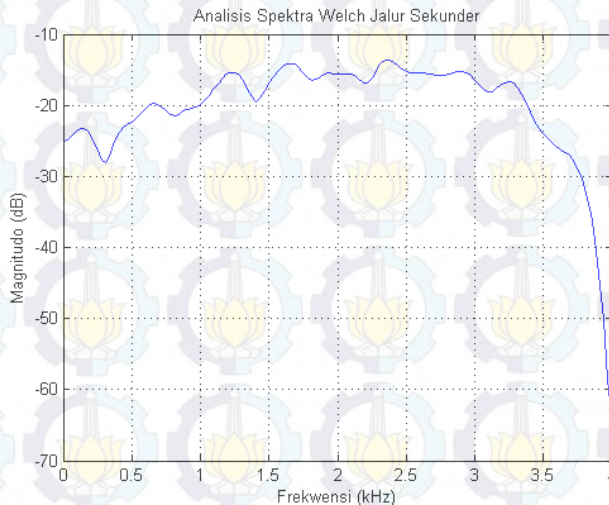
Atenuasi pasif meningkat kurang lebih sebesar 15 dB per oktaf di atas 1500 Hz. Data ini menjadi spesifikasi dari filter FIR yang akan dibuat. Sehingga pada penelitian kali ini filter FIR *lowpass* orde 20 dengan frekuensi *cut off* 1500 Hz digunakan sebagai pemodelan dari jalur primer. Pemodelan menggunakan perintah *fdatool* pada *command window* MATLAB. Hasil Pemodelan ditunjukkan melalui Gambar 3.7.



**Gambar 3.7** Filter FIR *Lowpass Equiripple* orde 20

### 3.5.3 Analisis Spektra Welch Jalur Sekunder

Propagasi jalur sekunder adalah jalur di mana anti *noise* dari keluaran *loudspeaker* menuju *error* mikrofon pada zona yang senyap. Propagasi jalur sekunder di estimasi menggunakan hubungan antara masukan dan keluaran dari sistem. masukan *di sini* adalah sinyal uji *white noise* yang keluar melalui *headphone* dan keluarannya adalah suara yang ditangkap oleh mikrofon. Seperti yang dilakukan pada jalur primer, propagasi jalur sekunder dicari dengan hubungan masukan dan keluaran dari sinyal. Analisis spektrum *welch* digunakan untuk mencari respon frekuensi dari propagasi jalur sekunder. Hasil analisis ditunjukkan pada Gambar 3.8.

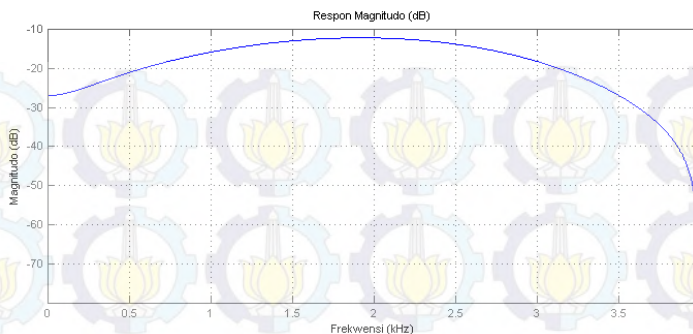


**Gambar 3.8** Analisis Spektra *Welch* dari Jalur Sekunder

### 3.5.4 Pemodelan Filter FIR Jalur Sekunder

Atenuasi meningkat kurang lebih sebesar 10 dB per oktaf ketika sinyal kurang dari 1000 Hz menuju 0 Hz dan atenuasi meningkat ketika sinyal lebih dari 3000 Hz menuju 4000 Hz. Data ini menjadi spesifikasi dari filter FIR Equiripple yang dibuat. Sehingga pada penelitian kali ini *bandpass* FIR Equiripple orde 20 dengan frekuensi *cut off* 1000 Hz dan 3000 Hz digunakan sebagai pemodelan dari jalur sekunder. Hasil pemodelan ditunjukkan melalui Gambar 3.9.





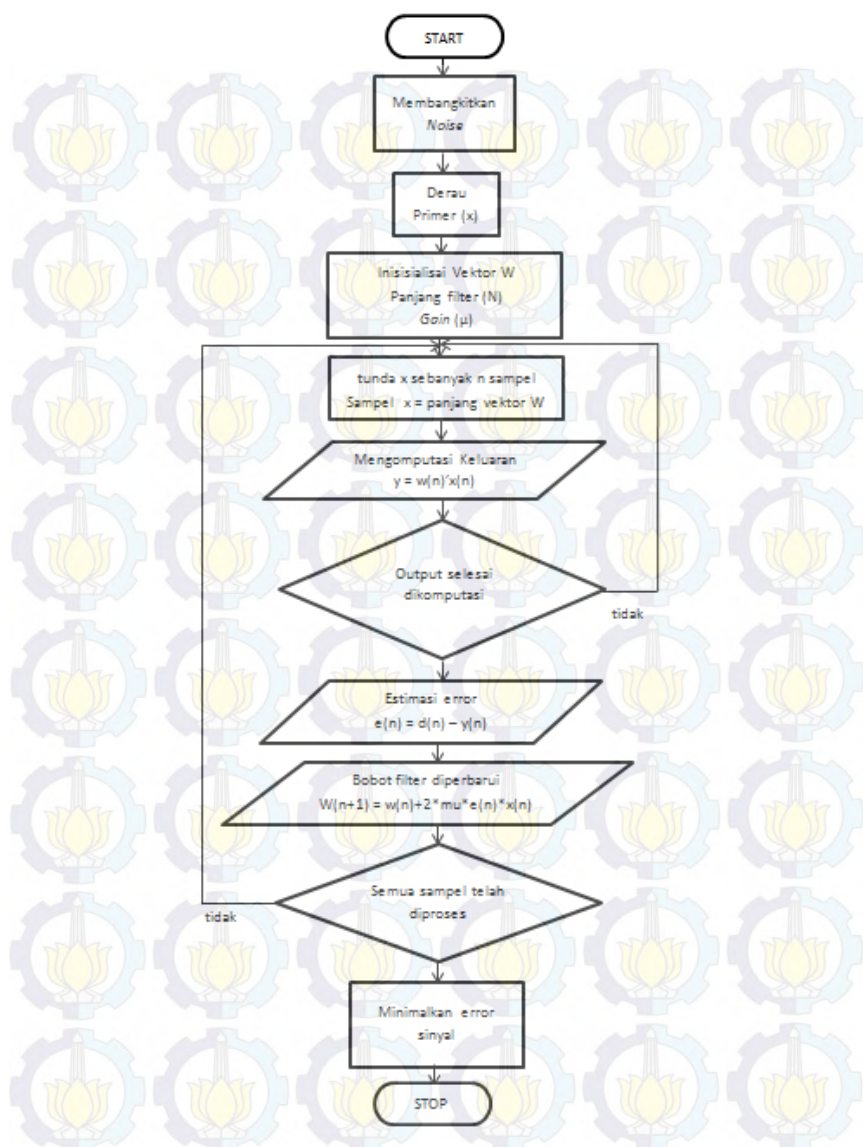
**Gambar 3.9** Filter FIR Bandpass Equiripple orde 20

### 3.6 Perancangan Active Noise Cancelling

#### 3.6.1 Flowchart Algoritma FxLMS

Gambar 3.10 mengilustrasikan alur lengkap dari proses filter adaptif. Pada awal *flowchart*, *Noise x* dibangkitkan melalui *signal generator*. Kemudian penentuan orde filter dan *step size* ditetapkan, di mana penentuan ini tidak bisa diubah ketika program LMS telah berjalan. Penentuan orde filter ditentukan sepanjang 32. Penentuan *step size* ditentukan antara nol dan setengah dari *eigenvalue* maksimal dari cuplikan sinyal referensi.

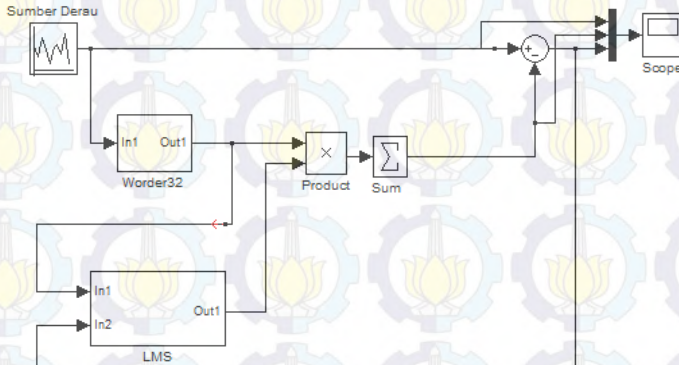
Pembobotan pada filter diinisialisasi sesuai dengan orde dari filter sehingga panjang dari vektor bobot sama dengan vektor filter, dengan kondisi awal vektor dari filter adalah nol. Sebagai contoh jika panjang filter adalah 32 maka vektor bobot diatur sebesar  $N = 32$ . Sehingga, 32 cuplikan pertama dari sinyal referensi dipilih dan dikonvolusi untuk menghasilkan keluaran  $y(n)$ . setelah mendapatkan keluaran filter, sinyal *error* dikalkulasi dari hasil substraksi antara keluaran filter dan sinyal derau yang ingin dihapus. Kemudian bobot dari filter diperbarui menggunakan algoritma LMS. Proses ini berulang, sehingga *error*  $e(n)$  dan  $y(n)$  selesai untuk semua cuplikan dan setiap iterasi sinyal referensi ditunda satu cuplikan dan 32 cuplikan berikutnya dikomputasi untuk keluaran cuplikan berikutnya. Akhirnya, bobot diperbarui pada setiap iterasi untuk meminimalkan sinyal *error* dan membuat keluaran filter sama dengan sinyal aktualnya (derau).



**Gambar 3.10** Flowchart dari algoritma LMS

### 3.6.2 Perancangan LMS

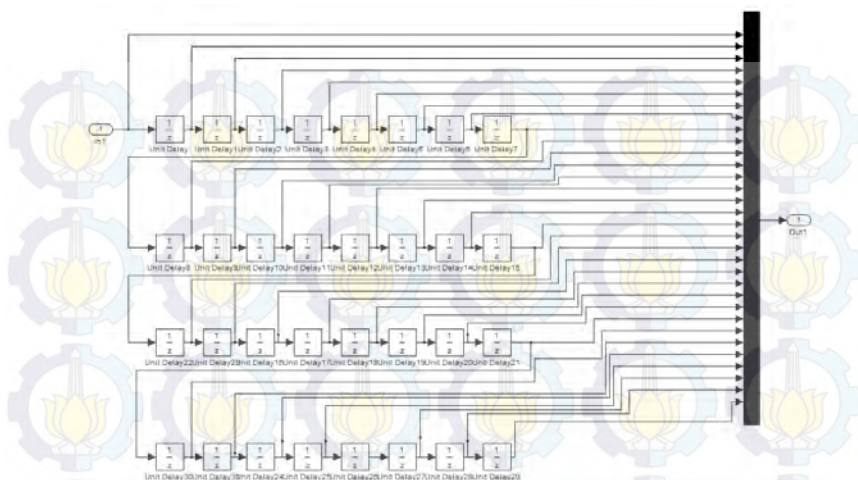
Program LMS dibuat menggunakan Simulink MATLAB. Program disusun berdasarkan *flowchart* pada Gambar 3.10. Program disusun menggunakan blok umum pada Simulink. Untuk sumber derau digunakan blok *noise generator*, sinyal dari *file .wav* dan dari *workspace*. Sumber derau ini menjadi sinyal masukan pada blok kontroler dengan orde 32. Selain itu sumber derau ini dihubungkan secara langsung dengan blok *sum* yang nanti sebagai proses substraksi antara sinyal sumber derau dengan sinyal keluaran kontroler. Blok *scope* digunakan untuk melihat sinyal *error*. Blok *mux* digunakan untuk melihat sinyal deraunya sendiri dengan sinyal anti *noise* di satu grafik pada *scope*. Blok Simulink dapat dilihat pada Gambar 3.11.



**Gambar 3.11** Filter Adaptif LMS di Simulink

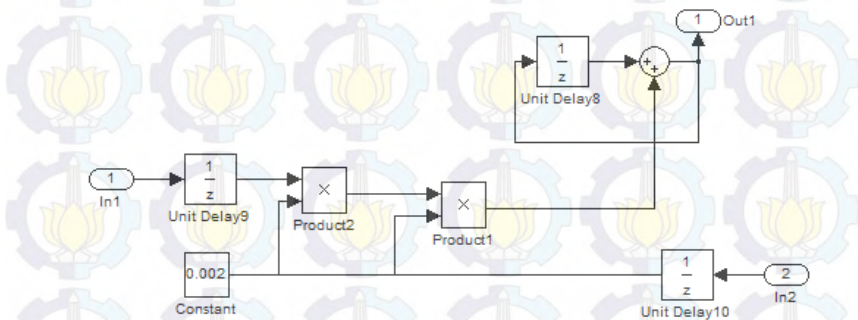
Isi dari blok subsistem kontroler  $w$  dapat dilihat pada Gambar 3.12. Blok *unit delay* digunakan sebagai orde filter untuk kontroler. Jumlah dari *unit delay* samaa dengan panjang filter yang telah ditentukan yakni 32. Dikarenakan nilai bobot sama dengan panjang filter, keluaran dari *unit delay* juga dihubungkan dengan blok LMS sebagai sinyal masukan.





**Gambar 3.12** Subsistem Berisi *Unit Delay*

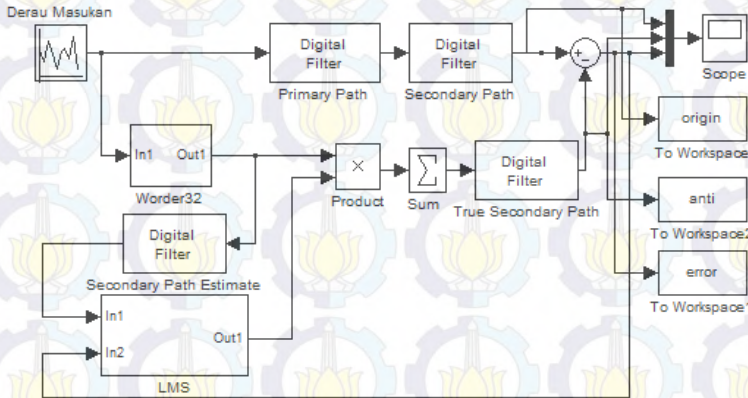
Isi dari blok subsistem LMS dapat dilihat pada Gambar 3.13. blok subsistem LMS menerima masukan dari sinyal referensi  $x$  dan sinyal  $error$   $e$ . Blok *constant* digunakan untuk menentukan *step size* dari LMS. Sinyal keluaran dari LMS dikalikan dan ditambahkan dengan sinyal keluaran kontroler  $w$ .



**Gambar 3.13** Algoritma LMS pada Simulink

### 3.6.3 Perancangan ANC Filtered $x$ Least Mean Square

Gambar 3.14 menunjukkan program ANC *filtered x least mean square* (FxLMS). Blok jalur primer dan jalur sekunder hasil pemodelan melalui blok *digital filter* pada Simulink. Filter yang digunakan adalah filter FIR dengan koefisien yang sama dengan filter yang telah didesain pada subbab sebelumnya. Filter yang digunakan juga sama yakni filter FIR di mana panjang koefisien sama dengan pemodelan.

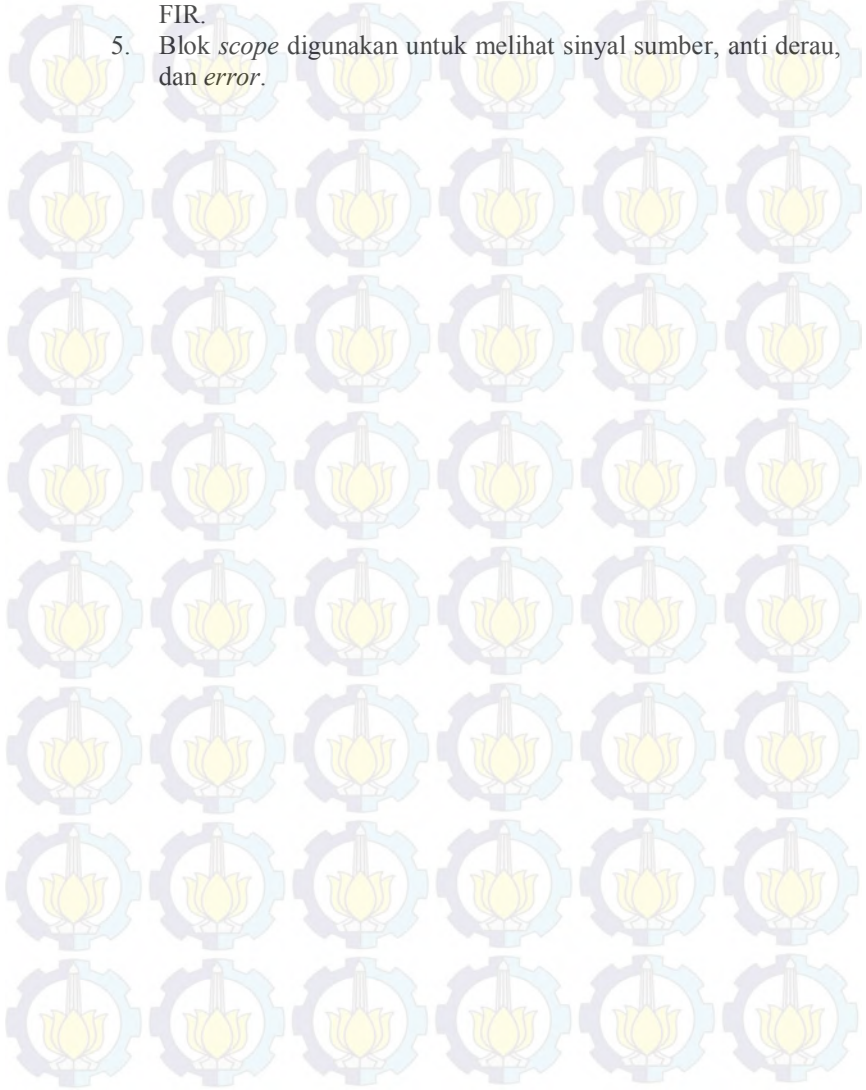


**Gambar 3.14** Penambahan Jalur Primer dan Jalur Sekunder

Berikut ini penjelasan program yang telah dibuat.

1. Sinyal referensi atau sumber  $x(n)$ , direpresentasikan dengan blok *noise*, *wav.file*, dan masukan dari *workspace* yang terdiri dari sinyal informasi dengan frekuensi *sampling* 8000 KHz.
2. Blok diagram jalur primer yang didapatkan dari perancangan filter FIR. Jalur primer menerima masukan secara langsung dari  $x(n)$  menghasilkan  $noise$  yang masuk ke dalam *headphone* yang dinotasikan dengan  $d(n)$ .  $d(n)$  adalah sinyal yang nanti diinterferensi dengan sinyal anti  $noise$ .
3. Jalur primer dimodelkan melalui blok Simulink *Digital FIR filter*. Pemodelan berdasarkan hasil perancangan.

4. Jalur sekunder dimodelkan melalui blok Simulink *Digital FIR filter*. Koefisien dari model didapatkan dari perancangan filter FIR.
5. Blok *scope* digunakan untuk melihat sinyal sumber, anti derau, dan *error*.





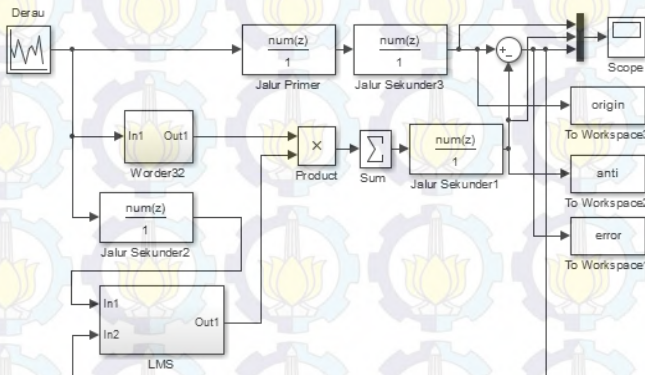
## BAB 4

### SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab kali ini performa dari program yang telah dirancang pada Bab 3 akan diujikan melalui simulasi dengan MATLAB dan Simulink. Pertama sistem diuji menggunakan sinyal uji *white noise* dan dianalisis hasilnya. Kemudian sistem diuji menggunakan *pink noise* dan dianalisis hasilnya. Terakhir sistem diuji dengan sinyal *engine sound* dan dianalisis hasilnya.

#### 4.1 Sistem ANC dengan Sinyal Masukan *White Noise*

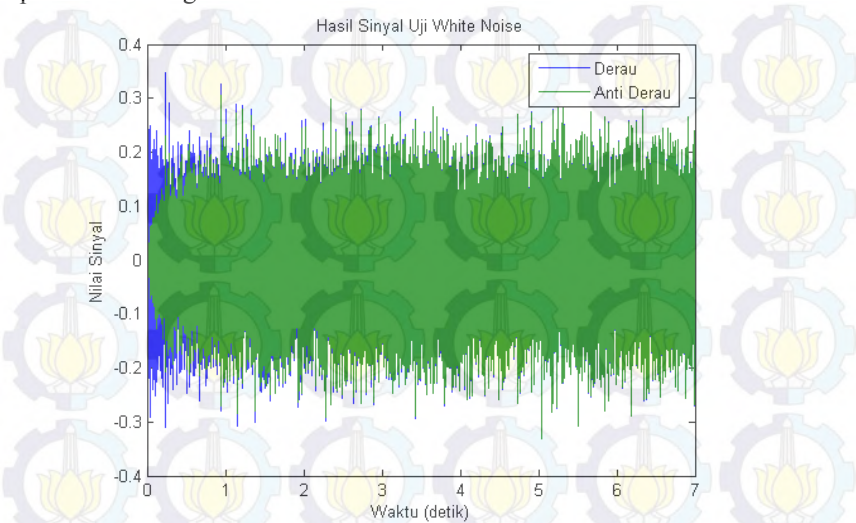
Gambar 4.1 menunjukkan program ANC melalui Simulink MATLAB. Untuk simulasi digunakan panjang filter sebesar 32 dan *noise* yang memiliki varians 1 dan rata-rata sama dengan 0. Parameter *step size*  $\mu$  dipilih sebesar 0,02. Nilai ini dipilih berdasarkan *trial and error*. Frekuensi *sampling* yang digunakan sebesar 8000 Hz.



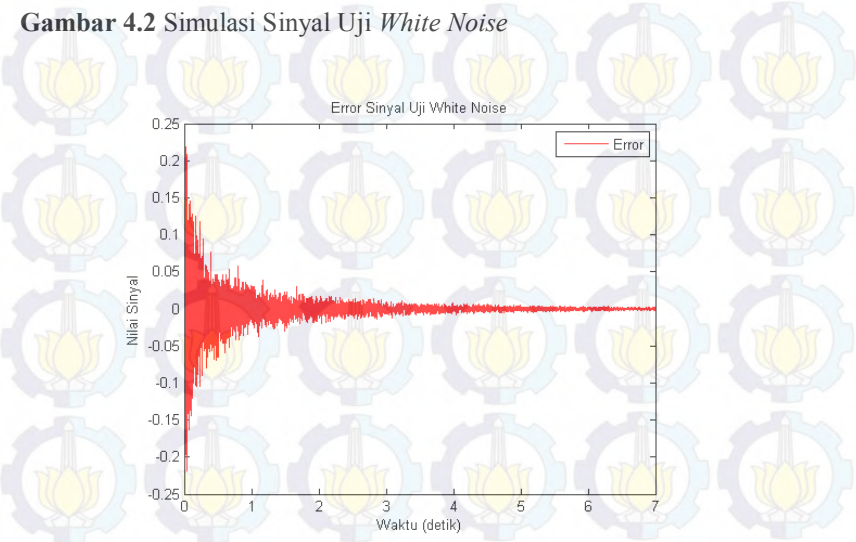
**Gambar 4.1** Simulasi FWANC dengan Sinyal Uji *White Noise*

Hasil pengujian dapat dilihat melalui Gambar 4.2 dan Gambar 4.3. sinyal *error* mulai konvergen pada detik ke 3. Konvergensi dapat dilihat melalui sinyal *error* (merah) pada Gambar 4.3. Dapat dilihat pada Gambar 4.2, Sinyal anti *noise* mulai identik dengan sinyal derau pada

detik ke 0,5. Sinyal *error* paling kecil dimulai ketika simulasi berjalan pada detik ke tiga.

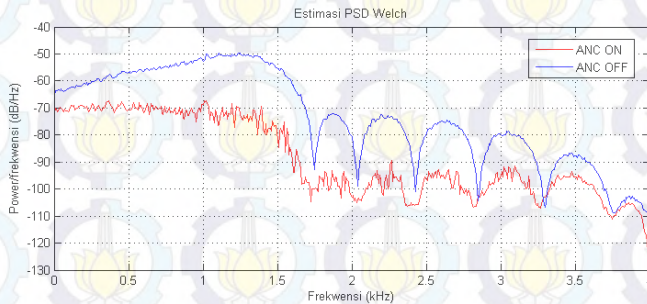


**Gambar 4.2** Simulasi Sinyal Uji *White Noise*



**Gambar 4.3** *Error Sinyal Uji White Noise*

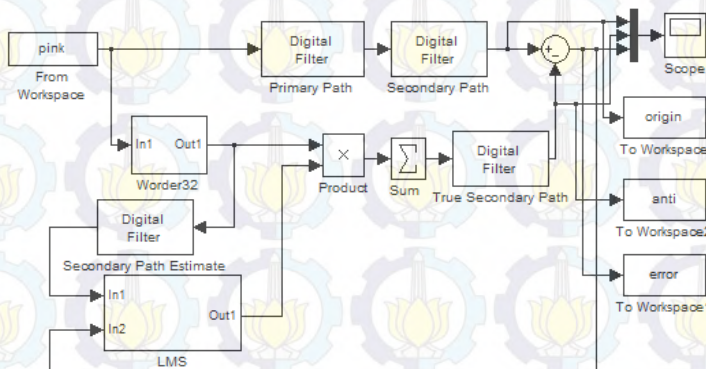
Gambar 4.4 menunjukkan analisis spektrum *welch* dari sinyal derau terhadap sinyal *error*nya. Atenuasi terbesar terjadi pada frekuensi 1000 Hz yakni lebih dari 20 dB. Atenuasi tidak begitu besar pada frekuensi 0-500 Hz yakni hanya sekitar 5 dB.



**Gambar 4.4** Analisis Spektra Sinyal Uji *White Noise*

#### 4.2 Sistem ANC dengan Sinyal Masukan *Pink Noise*

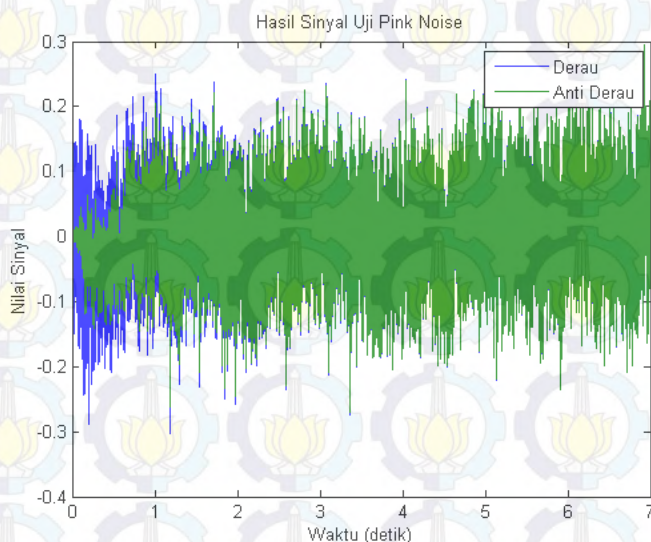
Gambar 4.5 menunjukkan program ANC melalui Simulink MATLAB. Untuk simulasi digunakan panjang filter sebesar 32 dan *pink noise* yang dibangkitkan melalui program yang telah disusun pada MATLAB. *Pink Noise* sendiri adalah *noise* dengan *mean* dan varian yang berbeda-beda. Parameter *step size*  $\mu$  dipilih sebesar 0,02. Nilai ini dipilih berdasarkan *trial and error*. Frekuensi *sampling* yang digunakan sebesar 8000 Hz.



**Gambar 4.5** Simulasi dengan Sinyal Uji *Pink Noise*

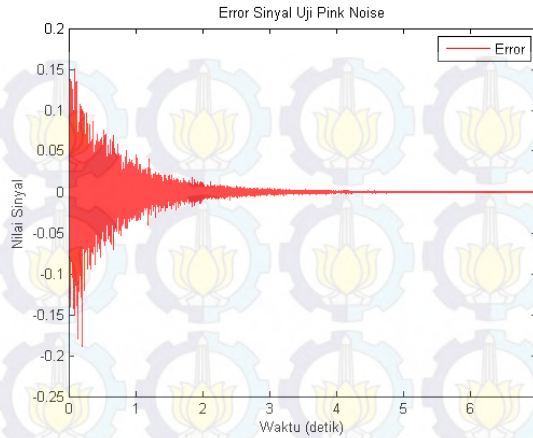


Hasil pengujian dapat dilihat melalui Gambar 4.6 dan Gambar 4.7. Sinyal *error* mulai konvergen pada detik ke 3. Konvergensi dapat dilihat melalui sinyal *error* (merah) pada Gambar 4.7. Sinyal anti *noise* mulai identik dengan sinyal derau pada detik ke 1 seperti yang terlihat pada Gambar 4.7. Sinyal *error* paling kecil dimulai ketika simulasi berjalan pada detik ke tiga. *Error* hasil simulasi mirip dengan hasil simulasi sinyal uji *white noise*.

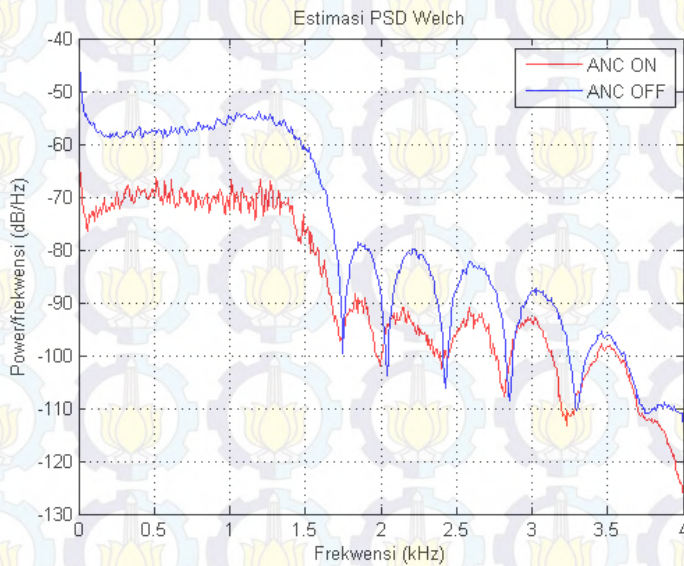


**Gambar 4.6** Hasil Simulasi Sinyal Uji *Pink Noise*

Dengan orde filter dan *step size* yang sama, sistem *feedforward* ANC FxLMS memiliki respon yang sama baik menggunakan sinyal uji *white noise* maupun sinyal uji *pink noise*. Perubahan orde filter yakni leih dari 32 tidak mempengaruhi bentuk dari sinyal anti derau. Sedangkan perubahan *step size* mempengaruhi kecepatan konvergensi dari sinyal *error*. Semakin besar nilai *step size* maka semakin besar kecepatan konvergensi begitu pula sebaliknya. Namun penentuan parameter ini tidak boleh diluar dari  $0 < \mu < 2/\lambda_{max}$  dan jika tidak ditaati, sinyal *error* akan menjadi divergen.



**Gambar 4.7** Error Sinyal Uji *Pink Noise*

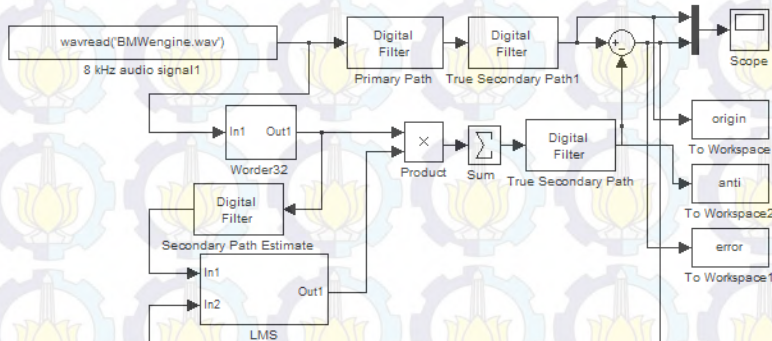


**Gambar 4.8** Analisis Spektra Sinyal Uji *Pink Noise*

Gambar 4.8 menunjukkan analisis spektrum *welch* dari sinyal derau terhadap sinyal *error*nya. Atenuasi terbesar terjadi pada frekuensi 0 Hz hingga 1000 Hz yakni lebih dari 20 dB. Ketika sinyal mencapai lebih dari 1500 Hz, atenuasi terjadi sebesar 10 dB.

### 4.3 Sistem ANC dengan Sinyal Masukan *Engine Sound*

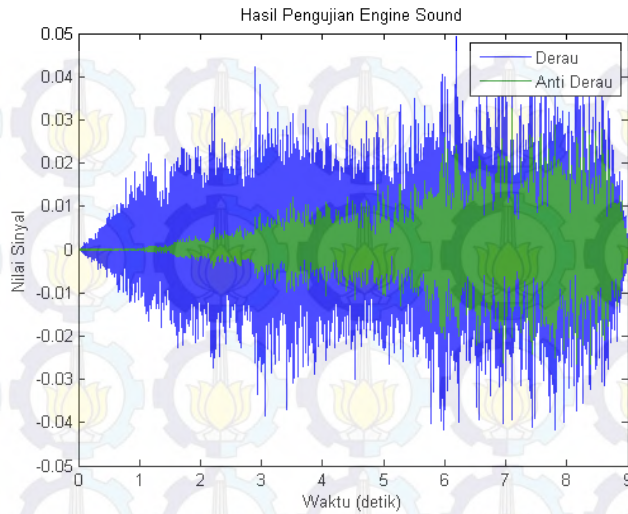
Gambar 4.9 menunjukkan program ANC melalui Simulink MATLAB. Untuk simulasi digunakan rekaman mesin mobil yang disimpan format *wav.file*. parameter *step size*  $\mu$  dipilih sebesar 0,5, mengingat nilai  $\mu$  yang lebih kecil seperti pada percobaan *white noise* dan *pink noise* belum mampu untuk meredam derau seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11. Nilai ini dipilih berdasarkan *trial and error*. Frekuensi *sampling* yang digunakan sebesar 8000 Hz.



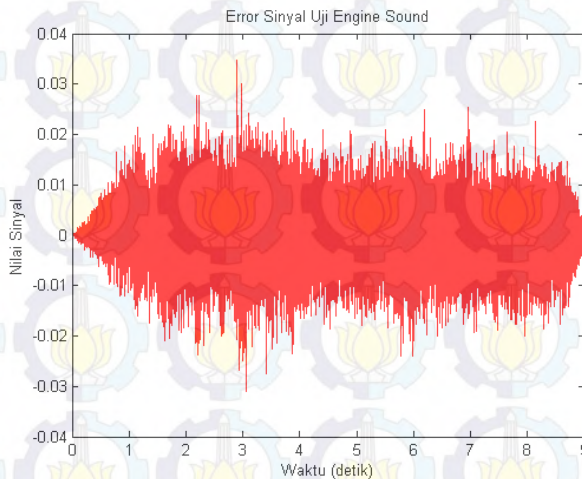
**Gambar 4.9** Simulasi dengan Sinyal *Engine Sound*

Hasil pengujian dapat dilihat melalui Gambar 4.12 dan Gambar 4.13. Sinyal *error* mulai konvergen pada detik ke 3. Konvergensi dapat dilihat melalui sinyal *error*. Sinyal *anti noise* mulai identik dengan sinyal derau pada detik ke tiga. Sinyal *error* paling kecil dimulai ketika simulasi berjalan pada detik ke lima meskipun tidak nol sepenuhnya.

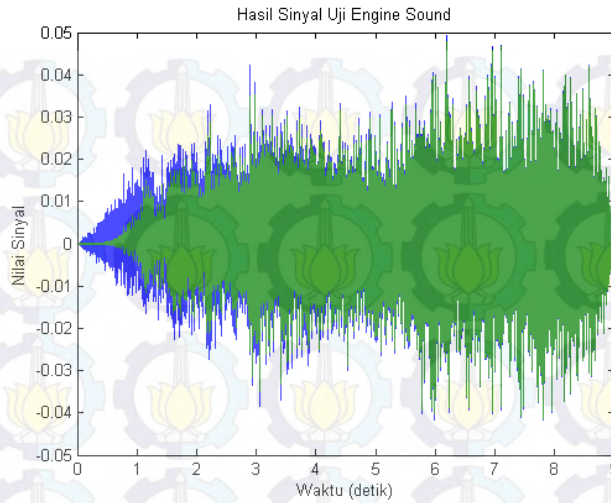




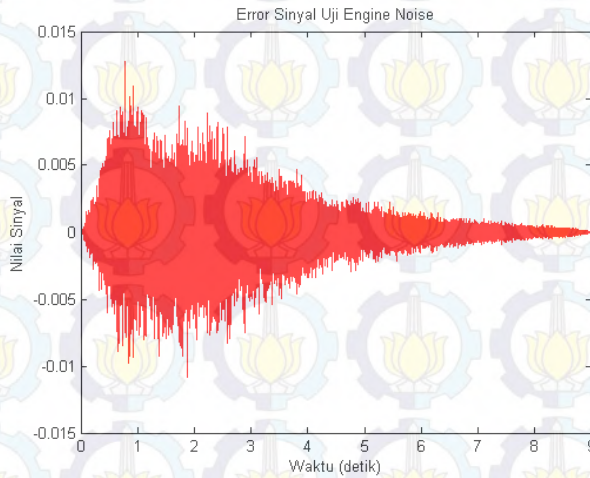
**Gambar 4.10** Simulasi Sinyal *Engine Sound* dengan  $\mu = 0,02$



**Gambar 4.11** Error Sinyal *Engine Sound* dengan  $\mu = 0,02$

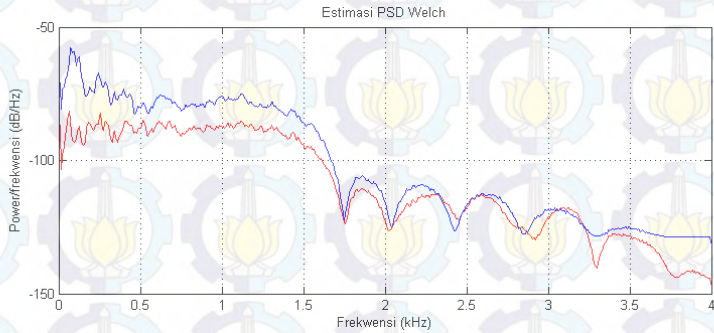


**Gambar 4.12** Simulasi Sinyal *Engine Sound* dengan  $\mu = 0,5$



**Gambar 4.13** Error Sinyal *Engine Sound* dengan  $\mu = 0,5$

Gambar 4.14 menunjukkan analisis spektrum *welch* dari sinyal derau terhadap sinyal *error*nya. Atenuasi terbesar terjadi pada frekuensi 0 Hz hingga 1000 Hz yakni lebih dari 30 dB. Ketika sinyal mencapai lebih dari 1500 Hz, atenuasi terjadi sebesar 5 dB.



**Gambar 4.14** Analisis Spektra Sinyal *Engine Sound*





## BAB 5

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian sistem ANC yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sistem ANC yang dirancang mampu meredam derau dari *white noise*, *pink noise*, dan suara derau yang berasal dari mesin mobil dengan kondisi suara mobil berubah-ubah amplitudo dan frekuensinya (tidak konstan).
2. *Error* mencapai nilai konstan pada detik ke 3 dengan orde filter 32 dan *step size* 0,02 pada pengujian Sinyal *White Noise* dan *Pink Noise*.
3. *Error* mencapai nilai konstan mendekati nol dengan orde filter 32 dan *step size* 0,5. Orde filter tidak mengalami perubahan ketika orde filter diubah namun semakin besar *step size*, semakin kecil *error* yang dicapai.

#### 5.2 Saran

Pemodelan jalur primer dan jalur sekunder perlu dilakukan dengan metode yang lebih baik supaya pemodelan lebih akurat dengan *headphone* aslinya.

## LAMPIRAN

### 1. Program Matlab Plot Grafik dari Sinyal

```
t = 0:0.000125:length(derau);  
t = t';  
plot(t,derau, t,anti)
```

```
figure  
plot(t,error,'r')
```

```
figure  
pwelch(error, 1024, [], [], 8000, 'onesided')  
hold  
pwelch(derau, 1024, [], [], 8000, 'onesided')
```

### 2. Membangkitkan Sinyal *Pink Noise*

```
function y = pinknoise(N)
```

```
if rem(N,2)  
    M = N+1;  
else  
    M = N;  
end
```

```
x = randn(1, M);
```

```
X = fft(x);
```

```
NumUniquePts = M/2 + 1;  
n = 1:NumUniquePts;  
n = sqrt(n);
```

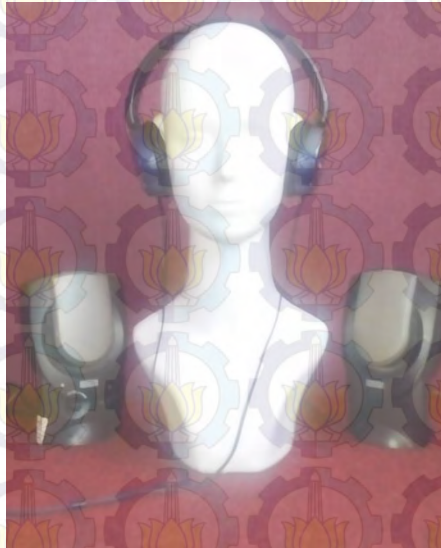
```
X(1:NumUniquePts) = X(1:NumUniquePts)./n;
```

```
X(NumUniquePts+1:M) = real(X(M/2:-1:2)) -  
1i*imag(X(M/2:-1:2));
```



```
y = ifft(X);  
y = real(y(1, 1:N));  
y = y - mean(y);  
yrms = sqrt(mean(y.^2));  
y = y/yrms;  
end
```

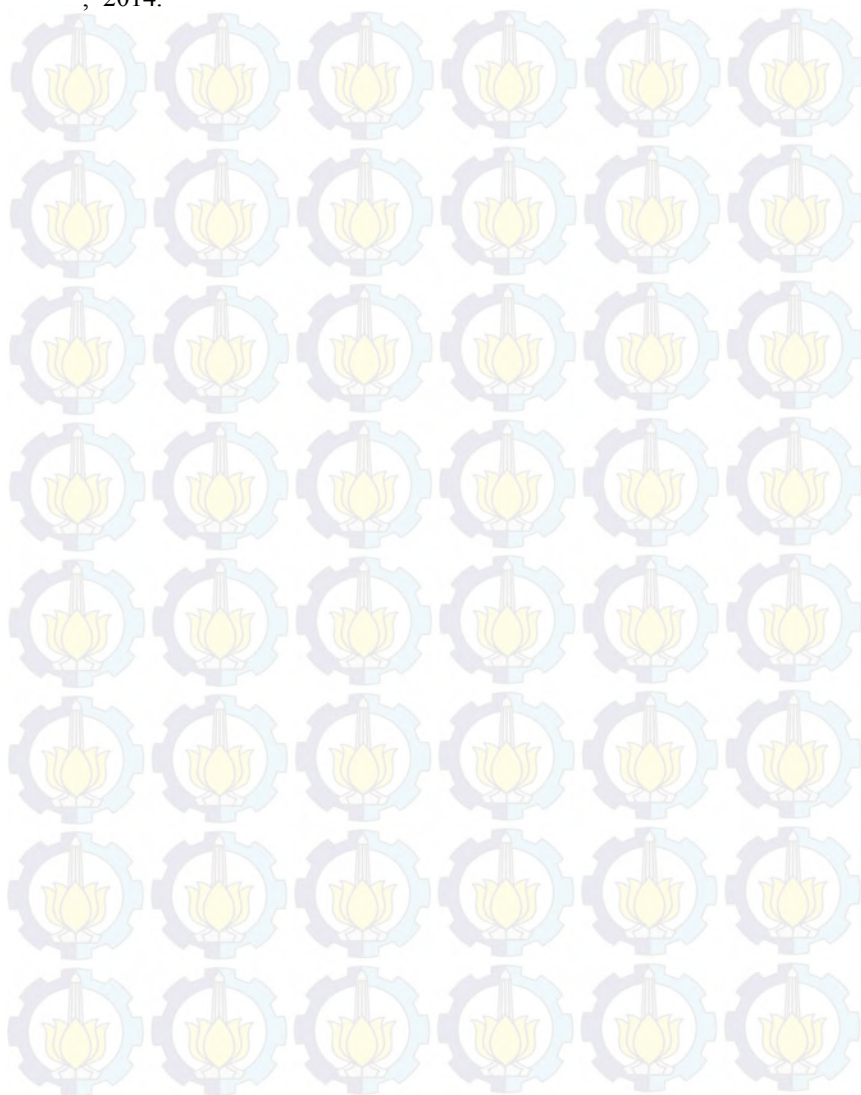
### 3. Gambar *Plant*



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S.S.Stevens dan Fred Waeshofsky, *Bunyi dan Pendengaran*, Jakarta: Pustaka Ilmu Life, 1981.
- [2] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*, San Diego: California Technical Publishing, 1999.
- [3] K. Ngo, "Digital Signal Processing Algorithms for Noise Reduction, Dynamic Range Compression, and Feedback Cancellation in Hearing Aids", *Thesis*, Belgia: Katholike Universiteit Leuven, 2011.
- [4] M. Guldenschuh, "New Approaches of Active Noise Control Headphones", *Thesis*, Graz: University of Music and Performing Arts Graz, 2014.
- [5] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory 5th edition*, Edinburgh: Pearson, 2014.
- [6] R. M. A. Falcao, "Adaptive Filtering Algrithm for Noise Cancellaiion", *Thesis*, Porto: University of Porto, 2012.
- [7] S. M. Kuo dan W. S. Gan, "Active Noise Control System for Headphone Application", *IEEE Transactions on Control Systems*, Vol.14, no.2, pp.331-335, 2006.
- [8] S. M. Kuo dan D. R. Morgan, "Active Noise Contol: A Tutorial Review", *Proceeding of IEEE*, Vol.87, no.6, pp. 943-973, 1999.
- [9] ....., "Matlab Primer", <URL: [www.mathworks.com/help/pdf\\_doc/matlab/getstart.pdf](http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/getstart.pdf)>, 2015.
- [10] ....., "the ultimate headphone/Audio", <URL: <http://www.teamliquid.net/>>, 2012
- [11] ....., "Tiny, Low-Cost, Single/Dual-Input, Fixed-Gain Microphone Amplifiers with Integrated Bias", <URL:

<https://www.maximintegrated.com/en/datasheet/index.mvp/id/3859>>  
, 2014.





## RIWAYAT HIDUP



Azhar Rasyid Firdausi lahir di Surabaya tanggal 16 Agustus 1992, merupakan anak pertama dari Dr. Ir. Muaffaq Achmad Jani M.Eng dan Rina Sukaningtyas. Setelah lulus dari SMA Negeri 5 Surabaya tahun 2011, melanjutkan studi di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada tahun yang sama.